

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Stanislav Holba, DiS.



# 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

## INOVACE VARHANNÍCH PÍŠŤAL

THE INNOVATION OF ORGAN PIPES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Holba, DiS.

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. Stanislav Holba, DiS.

**ID:** 195790

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Inovace varhanních píšťal

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte analýzu nejméně 4 druhů varhanních píšťal (retné, jazykové, s různou menzurou a různým průřezem). Zaměřte se speciálně na materiál, ze kterého jsou píšťaly vyrobeny. Zhodnoťte jeho mechanicko – akustické vlastnosti: rychlost zvuku v daném materiálu, jeho elasticitu - Youngův model pružnosti, akustickou konstantu ad. Stanovte, nakolik má na barvu a rezonanci vliv tvar píšťaly a nakolik materiál včetně tloušťky stěn. Věnujte se funkci oscilátoru: hrany a jednotlivých druhů jazýčků. Provedte analýzu barvy, kterou jednotlivé píšťaly generují: ve spektru zhodnoťte podíl harmonických složek (liché versus sudé), inharmonických i šumových. Témbr dejte do souvislosti s mechanickými vlastnostmi píšťal. Navrhněte inovaci - získání nových zajímavých tónů, které by rozšířily rejstříky varhan. Použijte nové kompozitní a jiné materiály společně se změnami tvarů píšťal. V simulačním programu (např. Ansys) sestavte virtuální matici, pomocí které nasimulujete korpus píšťaly a budete predikovat její novou barvu. Vyroberte nejméně 3 pilotní píšťaly, změřte jejich tón. Zhodnoťte, nakolik se simulace ukázala funkční a zda jste skutečně získal(a) novou barvu a jakým jiným nástrojům se případně barvy blíží.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.
- [2] Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M.: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

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

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 zvukovou barvou varhanních píšťal v souvislosti se způsobem buzení tónu, fyzickými rozměry a použitým konstrukčním materiálem. Zvuková barva jednotlivých píšťal je popsána pomocí spektrální analýzy a vybraných psychoakustických veličin. Získané poznatky jsou dále využity pro výrobu píšťal z atypických materiálů a modifikaci konvenčních píšťal. U materiálů použitých pro výrobu je provedena simulace rezonátorů s cílem zjistit teoretickou hodnotu rezonančních kmitočtů. Tyto hodnoty jsou následně porovnány s výsledky spektrální analýzy zvuku fyzických píšťal.

## Klíčová slova

retná píšťala, jazýčková píšťala, rychlá Fourierova transformace, spektrální analýza, rezonátor, jazýček

## Abstract

The thesis deals with the sound colour of organ pipes in relation to the way of tone excitation, physical dimensions of organ pipes and the construction material used. The sound colour of individual organ pipes is described by means of spectral analysis and selected psychoacoustic variables. The obtained knowledge is further used for the production of organ pipes from atypical materials and modification of conventional organ pipes. Resonator simulations are performed for the materials used for the production in order to determine the theoretical value of the resonant frequencies. These values are compared with the results of spectral analysis of the sound of physical organ pipes.

## Keywords

labial organ pipe, reed organ pipe, fast Fourier transform, spectral analysis, resonator, reed

## **Bibliografická citace**

HOLBA, Stanislav. *Inovace varhanních píšťal* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-24].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141424>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,  
Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

|                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| <b>Jméno a příjmení studenta:</b> | Bc. Stanislav Holba, DiS. |
| <b>VUT ID studenta:</b>           | 195790                    |
| <b>Typ práce:</b>                 | Diplomová práce           |
| <b>Akademický rok:</b>            | 2021/22                   |
| <b>Téma závěrečné práce:</b>      | Inovace varhanních píšťal |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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: 24. května 2022

-----  
podpis autora

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Mgr. MgA. Ondřeji Jiráskovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy a rady při zpracovávání této diplomové práce. Dále děkuji MgA. Tomáši Jeřábkoví za umožnění přístupu k teoretickým materiálům a pomoc při získání referenčních zvukových vzorků a Josefu Hrochovi za poskytnutí varhanních píšťal pro analýzu.

V Brně dne: 24. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ .....                                                      | 9         |
| SEZNAM TABULEK.....                                                       | 10        |
| ÚVOD .....                                                                | 11        |
| <b>1. KONSTRUKCE A OVLÁDÁNÍ VARHANNÍHO MECHANISMU .....</b>               | <b>13</b> |
| 1.1 MECHANISMUS OVLÁDÁNÍ VARHAN.....                                      | 13        |
| 1.1.1 Traktura mechanická .....                                           | 13        |
| 1.1.2 Traktura pneumatická .....                                          | 14        |
| 1.1.3 Traktura elektrická.....                                            | 14        |
| 1.1.4 Traktury smíšené.....                                               | 15        |
| 1.1.5 Hrací stůl .....                                                    | 15        |
| 1.1.6 Nástrojová skříň.....                                               | 16        |
| <b>2. PÍŠŤALY .....</b>                                                   | <b>17</b> |
| 2.1 PÍŠŤALA RETNÁ .....                                                   | 18        |
| 2.1.1 Vznik tónu u retné píšťaly .....                                    | 19        |
| 2.1.2 Základní teze o konstrukci retných píšťal .....                     | 19        |
| 2.1.3 Typické tvary retných varhanních píšťal.....                        | 22        |
| 2.1.4 Menzurace retných píšťal.....                                       | 24        |
| 2.2 PÍŠŤALA JAZÝČKOVÁ.....                                                | 26        |
| 2.2.1 Vznik tónu u jazýčkové píšťaly .....                                | 27        |
| 2.2.2 Základní teze o konstrukci jazýčkových píšťal .....                 | 27        |
| 2.2.3 Typické tvary jazýčkových varhanních píšťal .....                   | 29        |
| 2.2.4 Menzurace jazýčkových píšťal .....                                  | 29        |
| 2.2.5 Nárazná vs. průrazná jazýčková píšťala .....                        | 30        |
| <b>3. MECHANICKÉ A AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO VÝROBU PÍŠŤAL..</b> | <b>31</b> |
| 3.1 VLASTNOSTI DŘEVA .....                                                | 31        |
| 3.2 VLASTNOSTI KOVŮ.....                                                  | 34        |
| 3.3 VLASTNOSTI UMĚLÝCH HMOT .....                                         | 35        |
| 3.4 TABULKOVÉ HODNOTY VÝROBNÍCH MATERIÁLŮ .....                           | 36        |
| <b>4. ANALÝZA ZVUKU VYBRANÝCH VARHANNÍCH PÍŠŤAL.....</b>                  | <b>38</b> |
| 4.1 DEFINICE ZVUKOVÉHO VLNĚNÍ .....                                       | 38        |
| 4.2 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA .....                                              | 38        |
| 4.2.1 Popis spektra.....                                                  | 38        |
| 4.2.2 Spektrální centroid a roll-off.....                                 | 40        |
| 4.2.3 Definice a výpočet psychoakustických veličin.....                   | 41        |
| 4.2.4 Lineární prediktivní kódování .....                                 | 42        |
| 4.3 POSTUP MĚŘENÍ.....                                                    | 42        |
| 4.3.1 Měřený nástroj .....                                                | 42        |
| 4.3.2 Složení nahrávacího řetězce.....                                    | 42        |
| 4.4 POPIS NAMĚŘENÝCH HODNOT .....                                         | 43        |
| 4.4.1 Analyzované píšťaly .....                                           | 43        |
| 4.4.2 Naměřené hodnoty .....                                              | 46        |

|           |                                                                     |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5.</b> | <b>SIMULACE REZONÁTORŮ VARHANNÍ PÍŠŤALY V PROSTŘEDÍ ANSYS .....</b> | <b>50</b> |
| 5.1       | OBEČNÝ POSTUP ZÍSKÁVÁNÍ DAT .....                                   | 50        |
| 5.2       | SIMULACE REZONÁTORŮ A OZVUČNIC.....                                 | 50        |
| 5.2.1     | <i>Simulace píšťaly Principál</i> .....                             | 51        |
| 5.2.2     | <i>Simulace píšťaly Flétna zobcová</i> .....                        | 53        |
| 5.2.3     | <i>Simulace píšťaly Flétna hadicová</i> .....                       | 54        |
| 5.2.4     | <i>Simulace ozvučnice Hoboj (původní)</i> .....                     | 54        |
| 5.2.5     | <i>Simulace ozvučnice Hoboj (PET)</i> .....                         | 55        |
| <b>6.</b> | <b>VÝROBA A ÚPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH PÍŠŤAL.....</b>                 | <b>57</b> |
| 6.1       | PÍŠŤALA KOMBINOVANÁ .....                                           | 57        |
| 6.2       | FLÉTNÁ HADICOVÁ.....                                                | 58        |
| 6.3       | HOBOJ JAZYKOVÝ – PET OZVUČNICE.....                                 | 59        |
| <b>7.</b> | <b>POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH HODNOT REZONANCÍ .....</b>                   | <b>60</b> |
| 7.1       | SROVNÁNÍ POZIC FORMANTŮ PÍŠŤALY PRINCIPÁL .....                     | 60        |
| 7.2       | SROVNÁNÍ POZIC FORMANTŮ PÍŠŤALY FLÉTNÁ HADICOVÁ .....               | 61        |
| 7.3       | SROVNÁNÍ POZIC FORMANTŮ OZVUČNICE HOBOJ JAZYKOVÝ .....              | 62        |
| 7.4       | SROVNÁNÍ POZIC FORMANTŮ OZVUČNICE HOBOJ JAZYKOVÝ PET .....          | 64        |
| <b>8.</b> | <b>ANALÝZA SPEKTRA KONSTRUOVANÝCH PÍŠŤAL .....</b>                  | <b>66</b> |
| 8.1       | ANALÝZA PÍŠŤALY KOMBINOVANÉ .....                                   | 66        |
| 8.2       | ANALÝZA SPEKTRA FLÉTNY HADICOVÉ .....                               | 68        |
| 8.3       | ANALÝZA SPEKTRA JAZYKOVÉ PÍŠŤALY HOBOJ – RŮZNÉ OZVUČNICE .....      | 69        |
| 8.4       | ANALÝZA SPEKTRA JAZYKOVÉ PÍŠŤALY HOBOJ – RŮZNÉ JAZYČKY .....        | 71        |
|           | <b>ZÁVĚR .....</b>                                                  | <b>74</b> |
|           | <b>LITERATURA.....</b>                                              | <b>76</b> |
|           | <b>PŘÍLOHY .....</b>                                                | <b>78</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|     |                                                                                                |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Schéma a popis konstrukce retné varhanní píšťaly a) kovové otevřené b) dřevěné kryté .....     | 18 |
| 2.2 | Vznik třetího tónu u retné varhanní píšťaly .....                                              | 19 |
| 2.3 | Retné varhanní píšťaly otevřené .....                                                          | 22 |
| 2.4 | Retné varhanní píšťaly kryté a polokryté .....                                                 | 23 |
| 2.5 | Schéma a popis konstrukce retné varhanní píšťaly a) německého typu b) francouzského typu ..... | 26 |
| 2.6 | Nálevkovité, kombinované a cylindrické ozvučnice jazýčkových varhanních píšťal .....           | 29 |
| 3.1 | Struktura dřeva v různých rovinách .....                                                       | 31 |
| 4.1 | Typy zobrazení spektra .....                                                                   | 40 |
| 4.2 | Složení měřicího řetězce .....                                                                 | 43 |
| 4.3 | Píšťala Oktáva 4' .....                                                                        | 44 |
| 4.4 | Píšťala Chorálbas 4' .....                                                                     | 44 |
| 4.5 | Píšťala kvadratická dřevěná (ilustrační foto) .....                                            | 45 |
| 4.6 | Píšťala Trompeta jazýčková .....                                                               | 45 |
| 4.7 | Grafické zobrazení spekter analyzovaných píšťal .....                                          | 47 |
| 5.1 | Model trubice píšťaly Principál .....                                                          | 52 |
| 5.2 | Model trubice píšťaly Flétna zobcová .....                                                     | 53 |
| 5.3 | Model trubice píšťaly Flétna hadicová .....                                                    | 54 |
| 5.4 | Model ozvučnice píšťaly Hoboj jazýčkový .....                                                  | 55 |
| 5.5 | Model ozvučnice píšťaly Hoboj jazýčkový - PET .....                                            | 56 |
| 6.1 | Píšťala kombinovaná .....                                                                      | 57 |
| 6.2 | Flétna hadicová .....                                                                          | 58 |
| 6.3 | Hoboj jazýčkový s PET ozvučnicí .....                                                          | 59 |
| 7.1 | LPC graf a ERP graf – píšťala Principál .....                                                  | 60 |
| 7.2 | LPC graf a ERP graf – píšťala Flétna hadicová .....                                            | 61 |
| 7.3 | LPC graf a ERP graf – ozvučnice Hoboj .....                                                    | 63 |
| 7.4 | LPC graf a ERP graf – ozvučnice Hoboj PET .....                                                | 64 |
| 8.1 | Časový průběh tónu kombinované píšťaly .....                                                   | 66 |
| 8.2 | Jazýčky pro píšťalu Hoboj: a) bronzový, b) hliníkový, c) PET, d) dřevěný .....                 | 71 |

# SEZNAM TABULEK

|     |                                                                                          |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Hodnoty modulu pružnosti v tahu a hustoty látek.....                                     | 36 |
| 4.1 | Rozměry analyzovaných píšťal .....                                                       | 46 |
| 4.2 | Úroveň jednotlivých vyšších harmonických složek měřených píšťal .....                    | 46 |
| 5.1 | Rozměry píšťaly Principál.....                                                           | 51 |
| 5.2 | Rozměry píšťaly Flétna zobcová.....                                                      | 53 |
| 5.3 | Rozměry píšťaly Flétna hadicová.....                                                     | 54 |
| 5.4 | Rozměry ozvučnice Hoboj jazykový.....                                                    | 55 |
| 5.5 | Rozměry ozvučnice Hoboj PET .....                                                        | 56 |
| 7.1 | Orientační poloha formantových oblastí – Principál.....                                  | 61 |
| 7.2 | Orientační poloha formantových oblastí – Flétna hadicová .....                           | 62 |
| 7.3 | Orientační poloha formantových oblastí – Hoboj .....                                     | 63 |
| 7.4 | Orientační poloha formantových oblastí – Hoboj PET .....                                 | 65 |
| 8.1 | Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – kombinovaná.....       | 67 |
| 8.2 | Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – flétna hadicová.....   | 68 |
| 8.3 | Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – Hoboj (ozvučnice)..... | 70 |
| 8.4 | Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – Hoboj (jazyčky) .....  | 72 |

# ÚVOD

Náplní a cílem této diplomové práce je seznámit čtenáře s komplexními poznatky o různých vlastnostech varhanních píšťal a vlivu těchto vlastností na jejich zvukovou barvu. Z těchto poznatků je dále čerpáno při konstrukci varhanních píšťal z netypických materiálů za účelem pozměnění zvukového tónu.

V první části práce je popsán ovládací mechanismus varhan, druhy propojení hracího stolu se vzduchovým ventilem, jehož úkolem je rychlé vpuštění vzduchového proudu nutného ke správné rezonanci píšťaly. V této části je dále poukázáno na rozdíly mezi jednoduchými barokními nástroji a zvukově bohatými varhanami, konstruovanými od období renesance a samotný vliv nástrojové skříně a přidavných mechanismů na zvukový tón nástrojů.

Druhá část práce se věnuje kompletnímu popisu varhanních píšťal. Pro retné i jazýčkové píšťaly bude proveden popis vzniku tónu, jednotlivých částí i způsobů konstrukce a typů rezonátoru. Všechny tyto náležitosti jsou dány do souvislosti se zvukovou barvou. Dále bude (především u retných píšťal) podrobně popsán způsob určení jejich menzury.

Ve třetí kapitole proběhne seznámení s materiály pro výrobu varhanních píšťal (typickými i atypickými). První podkapitola se zabývá dřevními hmotami, jejich strukturou, hustotou, moduly pružnosti v různých směrech, atp. Druhá část osvětluje pojem slitina kovů, poukazuje na vlastnosti slitin pro výrobu píšťal a obsahuje přehlednou tabulku, ve které jsou vypsány hodnoty hustoty a modulu pružnosti pro kovové materiály používané při výrobě. Třetí část dále uvádí vlastnosti umělých hmot, se kterými bude v práci dále nakládáno jako s materiály, které mohou posloužit pro výrobu součástí varhanních píšťal.

Obsahem čtvrté části je analýza čtyř vybraných vzorků varhanních píšťal, u nichž je provedena analýza modulového kmitočtového spektra nahranych vzorků vyjádřena číselně, graficky i slovním popisem, který vysvětluje vliv intenzity jednotlivých harmonických složek na výsledný zvukový vjem. Dále je zde určena pozice energetického těžiště spektra jednotlivých píšťal a vypočteny některé psychoakustické veličiny.

Poměrně rozsáhlou část práce zabírá simulace a modelování těl rezonátorů varhanních píšťal (jak retných, tak i jazýčkových) prostřednictvím softwaru Ansys 2021 R2, ve

kterém je dále prováděna modální a harmonická analýza za účelem získání teoretických hodnot rezonančních kmitočtů, které by se měly projevit ve spektrální analýze a zvuku reálných píšťal.

Z materiálů využitých pro teoretický výpočet rezonančních kmitočtů u těl píšťal a ozvučnic budou vyrobeny funkční vzorky píšťal, jejichž zvuk bude analyzován opět prostřednictvím spektrální analýzy, přičemž výsledky poslouží k posouzení vlivu rezonančních kmitočtů na konečnou barvu zvuku. Dále bude u jazýčkových píšťal provedeno srovnání jazýčků vyrobených ze zcela odlišných materiálů (dřevo, kovy, plast).

V závěru textu proběhne interpretace získaných výsledků a posouzení celkového přínosu provedené práce.

# 1. KONSTRUKCE A OVLÁDÁNÍ VARHANNÍHO MECHANISMU

Píšťalové varhany jsou bezesporu fascinujícím hudebním nástrojem. I přes bohatou zvukovou škálu a originální zvuk každého nástroje je možné při poslechu poměrně snadno určit, že se jedná právě o zvuk varhan, který má ve světě zvukových barev všech hudebních nástrojů neochvějnou a nenahraditelnou pozici. Vyjma toho často odráží dobu, ve které byly postaveny a jejich konstrukce je i z výtvarného hlediska uměleckým dílem.

## 1.1 Mechanismus ovládání varhan

Základní součástí každých varhan a zároveň zdrojem zvuku je píšťala. V běžné praxi se lze setkat se dvěma typy konstrukčně zcela odlišných píšťal, a to retní a jazýčkovou, přičemž v každé z nich se tón tvoří zcela jinak.

Píšťaly jsou zpravidla pomocí stojánek či úchytů a háčků (tak, aby byly ve svislé poloze) usazeny do svrchní desky vzdušnice (tzv. píšťalnice). Ve varhanách je minimálně tolik vzdušnic, kolik je klávesnic na hracím stole. Význam vzdušnice spočívá v rozvedení vzduchu z měchu, který je uložen buďto přímo ve varhanní skříni nebo v prostorách poblíž, k jednotlivým píšťalám. Správný tlak vzduchu pro píšťalu je ve vzdušnici regulován tónovým ventilem. Existuje více druhů vzdušnic, které se u nástrojů používají především v závislosti na rozměrech nástroje a umístění píšťal [8].

O to, aby byl do píšťaly přiveden vzduch v požadovaném momentě (zpravidla po stisknutí klávesy na hracím stole) se stará tzv. traktura, což je zařízení sloužící právě k ovládání tónů a spínání či vypínání tónových rejstříků nástroje pomocí vybraného systému. Celý systém je pak logicky ovládán z herního stolu, kde je umístěn počet klaviatur (manuálů a pedálů), potřebný k rozeznění všech píšťal nástroje a jejich kombinací.

### 1.1.1 Traktura mechanická

K přenášení povelů mezi varhanním stolem a vzdušnicí je užito táhel, hřídelí a převodů (povětšinou ze dřeva, dřevěných a kovových kolíčků a hřebíčků) otevírajících ventil pro vpuštění vzduchu do píšťaly. Výhodou tohoto systému je jednoduché řešení případných poruch (rychlá analýza problému i ekonomická výhodnost opravy) a okamžitý přenos povelu z hracího stolu až k píšťale [2].

Nevýhodou je pak u většího počtu zapnutých rejstříků na hracím stole znatelný odpor kláves, který hráčům značně ztěžuje a znepříjemňuje technickou hru, hrané tóny však slyší okamžitě.

### **1.1.2 Traktura pneumatická**

V nástroji s pneumatickou trakturou přenáší impuls od kláves k ventilu ve vzdušnici stlačený vzduch, který je rozváděn nikoliv pomocí táhel či pák, ale úzkých trubiček („rourek“). To umožňuje měkkou hru na klávesy i snadné přepínání zvukových rejstříků bez ohledu na rozměr nástroje či množství píšťal, což paradoxně vyvolává nepřirozený pocit hráče při ovládání nástroje [19].

Ohromnou nevýhodou pneumatické traktury je též zpoždění mezi stiskem vybrané noty na varhanním stole a rozeznáním odpovídající píšťaly. Zmíněné zpoždění vzniká při tlakování spojovací trubičky, tento tlak je potřeba k otevření mechanismu vpouštějícího vzduch do píšťaly. Tento typ traktury dosáhl nejvyšší popularity v první třetině 20. století, později se od tohoto systému upustilo, případně dochází ke kombinaci s jiným typem traktury [2]

### **1.1.3 Traktura elektrická**

Nejmodernější a stále vyvíjená z užívaných varhanních traktur je traktura elektrická. V principu je výstup každé klávesnice vyveden do řídicího členu, odkud je pomocí kabeláže přenášen signál do akčního členu, který poté otevírá patřičné ventily uvolňující vzduch do píšťal. V modernějších podobách elektrické traktury se vyskytují D/A a A/D převodníky, mikroprocesory či optické kabely a běžně se využívá i MIDI protokol pro přenos zvukové informace[1].

Jasnými přednostmi tohoto typu traktury je eliminace zpoždění přenosu mezi hracím stolem a rozeznáním píšťaly, často pak možnost transpozice (tj. posun notové výšky na klaviatuře po půltónech) či jednoduché přidání dalších nástrojových zvuků např. prostřednictvím zvukových bank navzorkovaných hudebních nástrojů, jejichž výška je řízena pomocí MIDI protokolu.

Mezi velké nedostatky patří opět nepřirozenost při stisku kláves, podobně jako tomu je u pneumatické traktury, dále pak vlivem neustálého vývoje nových technologií rychlé technické stárnutí, náročná technická údržba a nutnost stálého napájení elektrickým proudem [2][19] .

#### 1.1.4 Traktury smíšené

Kombinací výše uvedených typů vznikají traktury smíšené (kombinované). Nejčastější formou smíšené traktury je pneumacko-elektrická kombinace. Vzniká často úpravou původní pneumacké traktury u velkých varhan. Přidaná elektrická součást nahrazuje původní neproblematičtější místa pneumacké traktury (zejména od prostoru hracího stolu až po vzdušnici)[1]. U několika varhan lze objevit i elektricko-mechanickou trakturu, které umožňuje přidání prvků typických pro pneumackou trakturu, např. crescendo.

Nejstarší z kombinací traktur je tzv. Barkerova páka (podle varhanáře Charlese S. Barkera), což je forma pneumackého posilovače mechanické traktury. Jde o zkrácení vzdálenosti mezi pákou klávesy a tónovým ventilem vložením vzduchové komory s relém a ventily do ovládacího systému. To umožňuje snížení odporu kláves při zachování pocitu kontaktu s tónovým ventilem. Nevýhodou tohoto systému je zvýšení složitosti a značná hlučnost ovládacího mechanismu [2].

#### 1.1.5 Hrací stůl

Hrací stůl u varhan je místo ovládající všechny prvky nástroje. Každá píšťala je po nalažení připojena k patřičné klávese ve varhanním stole. Tyto klávesy pak slouží pro praktickou hru na hudební nástroj a sdružují se do manuálů a pedálové klávesnice.

Manuálová i pedálová klávesnice má typické rozložení kláves, známé třeba z klavíru či cembala, využívající tzv. temperované ladění (pokud chceme tón o frekvenci  $f$  přeladit výš o půl tónu, frekvence nového tónu bude součinem frekvence tónu původního a čísla  $\sqrt[12]{2}$ ).

Standardní varhany mají 1 až 3 manuály, aby bylo možné lépe využívat zvukový potenciál všech píšťal. V případě dvou manuálů je spodní využíván pro silnější rejstříky, nástroj tedy hraje mohutněji, silněji, horní manuál se využívá jako kontrast, a to jak dynamický, tak témbrový. Pedálová klaviatura se ovládá nohami, rozložení tónů je totožné se standardní nástrojovou klávesnicí.

Vyjma klávesnic, ovládajících vpuštění vzduchu do píšťal ve varhanní skříně je součástí hracího stolu též ovládání rejstříků. Pomocí pák (u mechanické traktury) či tlačítek (u pneumacké a elektrické traktury) se volí kombinace současně znějících píšťal pro hraný tón. Spuštěním více rejstříků současně jsou do praxe uvedeny jednoduché zvukové syntézy, které způsobují zásadní změny v momentálním zvuku nástroje.

Počet zvukových rejstříků ve varhanách je dán počtem druhů píšťal v nástroji. U menších nástrojů se často aplikuje rozšíření varhanních rejstříků pomocí přespojování kdy jsou píšťaly jednoho zvukového rejstříku využity pro jiný samostatný rejstřík, ve němž však zní v jiné výškové poloze (např. o oktávu výše či níže než u původního rejstříku). Nástroje s elektrickým ovládáním, které využívají MIDI rozhraní, mohou využívat i zvuky navzorkované, které nejsou zastoupeny v nástrojové skříně fyzicky v podobě píšťal, ale jsou přehrávány ze zvukové banky pomocí reproduktorů. Tímto způsobem lze i v malých sálech či chrámech simulovat zvuk velkolepých a světově proslulých nástrojů.

U pneumatických a elektrických traktur je pak běžné využívání „kombinací“, tedy kombinovaných rejstříků snadno spustitelných pomocí jednoho tlačítka, nebo zesilování pomocí „crescendo válce“, který je ovládán nohou a jehož rolováním se spínají jednotlivé rejstříky, a to od těch nejtišších flétnových zvuků až po „tutti“ čili všechny dostupné rejstříky ve stroji [2].

#### **1.1.6 Nástrojová skříň**

Varhanní skříň lze společně s tzv. prospektovými píšťalami označit jako „tvář nástroje“. Bývají tvarově velmi rozmanité v závislosti na prostoru, ve kterém jsou varhany konstruovány a jejich záměrem není jen dobře vypadat, ale i zanechat věrný otisk a pevnou připomínku doby, kdy byly zkonstruovány. Výzdoba nástrojů tedy odpovídala jednotlivým slohovým stylům (renesance, baroko apod.).

Úkolem varhanní skříně však není jen funkce estetická, ale i funkce ochranná, kdy chrání důležité komponenty nástroje (píšťaly i ovládací prvky). Nemalou měrou se také podílí na vyzařování tónových píšťal, a tedy i výsledném zvuku nástroje [9].

V průběhu staletí se do varhanní skříně prosadil i prvek částečně regulující hlasitost varhan, aniž by bylo nutné vypínat některé rejstříky a tím barevně ochuzovat hrané tóny. Jedná se o žaluzie, což jsou dřevěné desky o stejné šířce. Ty tvoří mechanickou zábranu před píšťalami prospektu, čímž utlumují vyzařování z nástrojové skříně a snižují hlasitost nástroje. Tímto způsobem lze však regulovat hlasitost varhan pouze v omezené míře, není možné takto utlumit nástroj zcela, to však ani není úkolem žaluzií. Pokud jsou žaluzie vyrobeny správně a přesně do sebe zapadají, měly by tlumit zvuk rovnoměrně na všech kmitočtech. Otáčení žaluzií se provádí pedálem, a to buďto mechanicky pomocí táhel, nebo pomocí trubiček a tlaku vzduchu či regulací žaluziového elektromotoru [9].

## 2. PÍŠŤALY

Varhanní píšťala je základním a majoritně zastoupeným zvukovým zdrojem, ať už se jedná o varhany starobylé či moderní konstrukce. Jedná se o dutiny zpravidla kruhového či obdélníkového průřezu, do nichž je vháněn vzduch pod určitým tlakem.

Předchůdcem dnes známých píšťal byly píšťaly typově podobné píšťalám Panovy flétny nebo podélné flétny, byly totiž výhradně válcového tvaru, otevřené a se stejným průměrem průřezu pro všechny dostupné tóny. Řada tónů byla značně omezená, neboť tento tvar píšťal byl pro hluboké tóny příliš úzký, pro tóny vyšší byl naopak průměr píšťal příliš velký. Z tohoto důvodu docházelo i k barevným zlomům v rámci jedné tónové řady. Pro nízkou zvukovou intenzitu bývaly často píšťaly zdvojeny až ztrojeny. Od 14. – 15. století dochází ke změně v konstrukci píšťal, kdy píšťaly přestávají mít jednotný průměr, ten se přizpůsobuje délce píšťaly podle určitých poměrových vztahů. Toto přizpůsobení můžeme označit jako počátek jednoznačné menzura<sup>1</sup> píšťal.

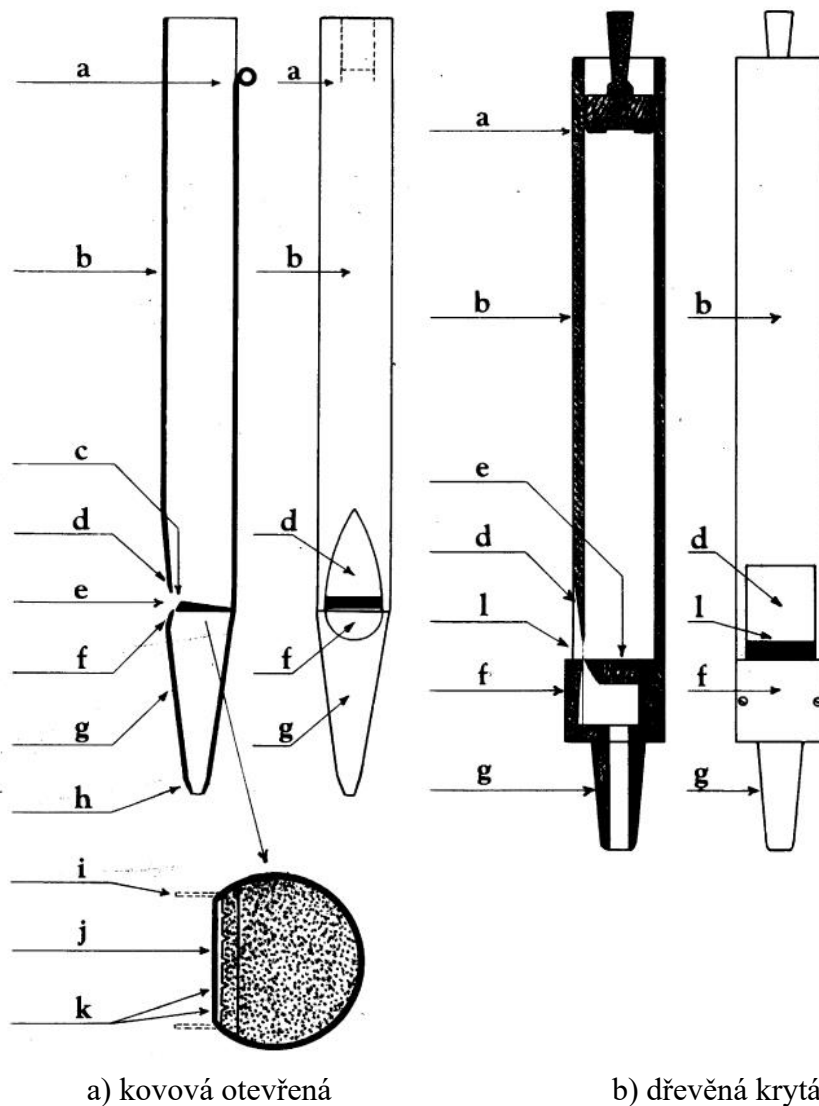
Rozvoj píšťal probíhal i v renesanci, kdy se naplno projevil vliv menzury, tvaru a konstrukčního materiálu na výsledný zvuk píšťaly. V tomto období docházelo i k vývoji retných píšťal a vynálezu píšťal jazýčkových. Barokní varhany lze považovat za vrcholné období zvukového vývoje píšťal, popularita varhan byla toho času ohromná, což dokazuje i rozsáhlá varhanní literatura od proslulých varhanních mistrů z této doby. Se zavedením temperovaného ladění pak konstrukce nástrojů přejímá jednotný princip, píšťaly mají označení konkrétní výšky tónů a jsou řazeny do pyramidy podle velikosti. Devatenácté století přináší průmyslovou výrobu píšťal. Romantismus přináší i do varhanní hudby více prožitku, procítění, širší dynamiku (výše zmíněný vynález žaluziové skříně) a snahu o napodobení zvukové barvy konkrétních dechových či strunných nástrojů i lidského hlasu, což se do jisté míry dařilo a u nástrojů z této doby lze skutečně nalézt takto označené rejstříky. S příchodem dalších uměleckých směrů docházelo počátkem 20. století k experimentům se zvukem varhanních píšťal, varhanní reforma, která proběhla v 30. letech minulého století však učinila těmto tendencím přítrž, čímž bylo potlačeno úsilí o „napodobení nenapodobitelného“. Po této reformě začali konstruktéři čerpat z výrobních postupů osvědčených již od dob baroka s využitím nových metod z oblasti zpracování materiálů a elektroakustiky [12].

---

<sup>1</sup> Menzura = poměr mezi průměrem a délkou trubice

## 2.1 Píšťala retná

Konstrukce varhanní retné píšťaly je k vidění na následujícím obrázku (2.1) [12]:



Obr. 2.1 Schéma a popis konstrukce retné varhanní píšťaly a) kovové otevřené b) dřevěné kryté

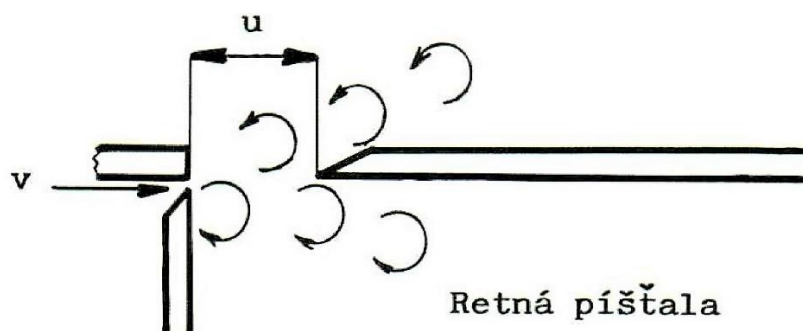
Popis částí obrázku 2.1: a: ladítko<sup>2</sup>, b: tělo píšťaly, c: úkos jádra, d: horní ret, e: jádro, f: spodní ret<sup>3</sup>, g: noha, h: špička nohy, i: boční vousy, j: průlinka, k: vpichy na jádře, l: výřez

<sup>2</sup> U dřevěné kryté píšťaly se jedná o zátku, která plní funkci ladítka

<sup>3</sup> U dřevěné píšťaly se jedná o tzv. předkrývku

### 2.1.1 Vznik tónu u retné píšťaly

Proud vzduchu pod určitým tlakem prochází do vnitra píšťalovou nohou **g**, kde je nasměrován úzkou průlinkou **j** na ostrou hranu horního rtu **h**, čímž se tento tok změní v turbulentní proudění (obr. 2.2) [16][12]. Tvar a intenzitu usměrněného toku vzduchu ovlivňuje mimo průlinku **j** také úkos jádra **c** a perforace jádra **k**. Po obou stranách hrany se začnou tvořit periodicky se opakující víry, čímž vzniká tzv. třecí tón (zvuk podobný například zvuku švihnutí provazu ve vzduchu).



Obr. 2.2 Vznik třecího tónu u retné varhanní píšťaly.

*„Frekvence třecího tónu je přímo úměrná rychlosti proudění vzduchu a nepřímo úměrná vzdálenosti hrany od štěrbin“* [16]. Pokud by tedy nenavazoval rezonátor (vzdušný sloupec píšťaly), rostla by frekvence třecího tónu přímo úměrně se stoupající rychlostí tlaku vzduchu. Po dosažení mezního tlaku vzduchu však dojde k rozpadnutí vírů a frekvence třecího tónu skokově vzroste na dvojnásobek (resp. trojnásobek atd.). Spektrum třecího tónu je podobné spíše filtrovanému šumu, nežli tónovému spektru.

Pokud je připojen rezonátor, vzniká funkční píšťala, a je-li frekvence třecího tónu poblíž rezonanční frekvence, píšťala se rozezní. Při zvyšování tlaku vzduchu sice roste frekvence třecího tónu, avšak výška tónu píšťaly se promění až v momentě, kdy se frekvence třecího tónu přiblíží k další rezonanční frekvenci píšťaly. Jak bylo uvedeno výše, délka rezonátoru má vliv na tónovou výšku (čím delší rezonátor, tím hlubší je znějící tón) [16].

### 2.1.2 Základní teze o konstrukci retných píšťal

Ing. Plánský definuje ve skriptu *Zařízení varhan – píšťaly* [12] dvanáct elementárních pravidel, od nichž se má odvíjet každá konstrukce nových píšťal:

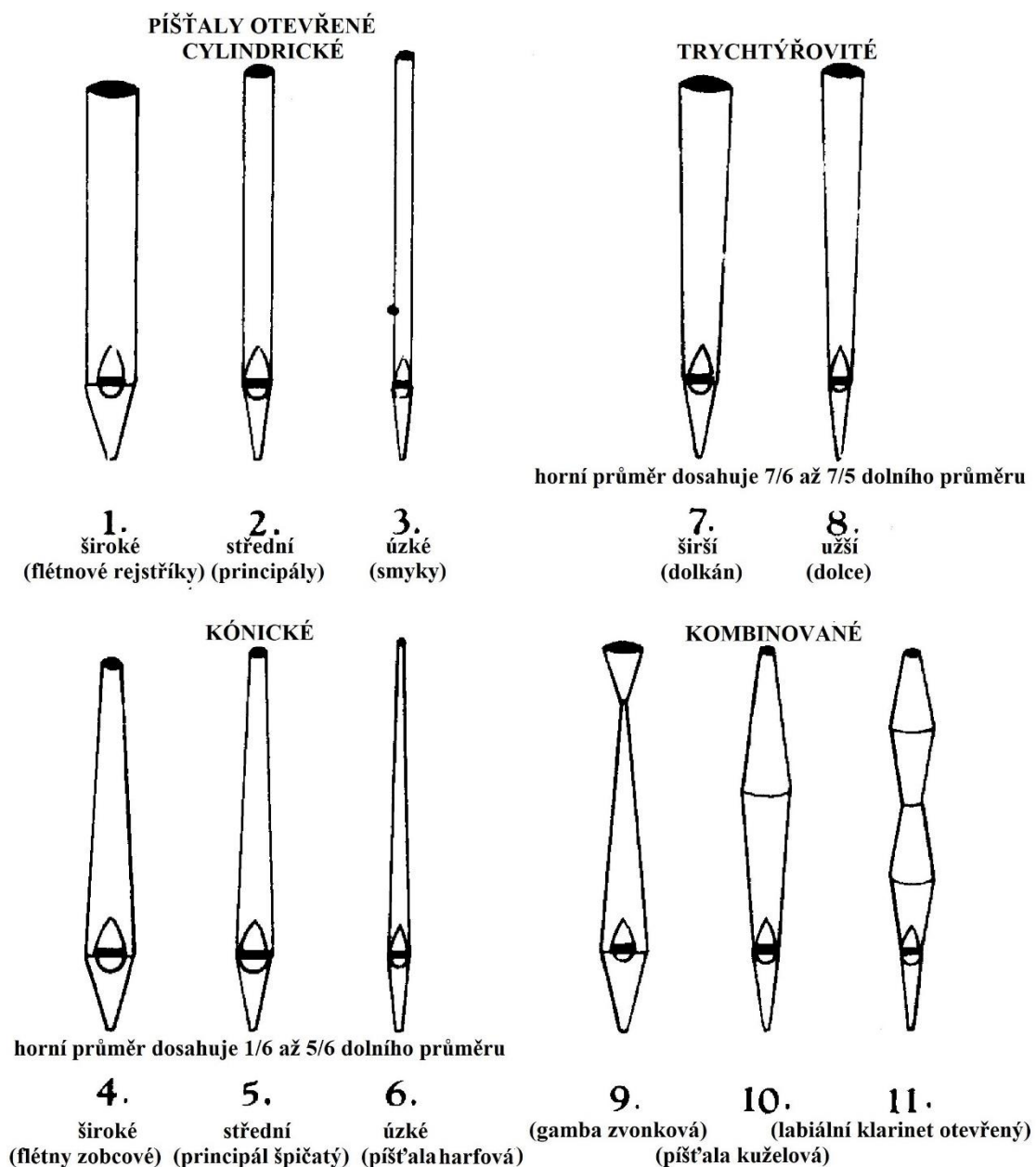
1. Parametry píšťaly jsou na sobě závislé (rozměry píšťal jedné tónové řady lze od výchozí píšťaly dopočítat). Je tak zachován podobný zvukový tón pro celou chromatickou řadu. Těmito rozměrovými souvislostmi se zabývá menzura. Ta prostřednictvím poměru určí potřebné hodnoty pro výrobu a naladění píšťal.
2. Výška tónu je dána délkou těla píšťaly. Pro upřesnění: jedná se o délku kmitajícího vzduchového sloupce tj. o vzdálenost od horního rtu po souvislý konec těla píšťaly, který je dán ladítkem. Výšku tónů lze ovlivnit typem konstrukce píšťaly. Například krytá píšťala má pro stejnou výšku tónu poloviční činnou délku nežli píšťala otevřená nebo píšťala kónická má pro stejný tón kratší činnou délku než píšťala válcová.
3. Pro zachování tónové barvy v jedné rejstříkové řadě musí dané délce odpovídat i šířka píšťaly. Pokud je píšťala při dané délce užší, ve zvukovém spektru se nachází více harmonických složek, což vytváří zvukově bohatší tón (pocitově ostřejší, podobný smykům). Na základě tohoto tvrzení lze pak usoudit, že je-li při dané délce píšťala širší, tón bude obsahovat méně intenzivní vyšší harmonické složky a zvuk bude celkově kulatější, podobný flétně.
4. Šířka výřezu retné píšťaly má vliv na tónovou dynamiku. Čím je výřez širší, tím hlasitější (a částečně ostřejší) tón píšťala produkuje.
5. Výška výřezu je pevně spjata s tlakem vzduchu v noze píšťalu. Pokud je tedy nutné snížit tlak vzduchového proudu přicházejícího do píšťaly, musí se adekvátně snížit i výřez v píšťale (což je poněkud nesnadné). Výška výřezu se projevuje v barvě tónu a určuje přesnost nasazení. Nízký výřez v píšťale má na následek rychlé a ostré nasazení, vedoucí ke snadnému přefukování tónu, kdežto vysoký výřez činí tón tupějším, s nekonkrétním nasazením.
6. Zásadní vliv na barvu tónu má materiál, ze kterého je píšťala vyrobena. Ostatně kvalitu nástroje lze posoudit podle píšťalového materiálu (při výskytu především cínových slitin lze hovořit o kvalitních nástrojích). Tvrdost materiálu podporuje vznik intenzivních vyšších harmonických složek, kdežto materiály měkké mají naopak důrazný fundament.
7. Tlak vzduchu v moderních píšťalách dosahuje hodnot okolo 500–700 Pa. Bývá kladen důraz na co největší přítok vzduchu do píšťaly (otvor do píšťaly není zúžený). Síla tónu je významně spjata se šířkou průlinky a správnou menzurací.

8. Vpichy na jádru slouží především ke konkrétnějšímu a jednoznačnému nasazení tónu bez inharmonicit. Zároveň však potlačují část zvukového spektra a omezují šumovou složku ve zvuku, což může být u některých rejstříků (typicky smyky) nežádoucí. Proto se u smyků objevuje hustá síť drobných vpichů, kdežto u principálů a flétnových rejstříků je vpichů na jádru jen poskromnu nebo je jádro zcela bez vpichů.
9. Rozličný tvar píšťaly je spolu s menzурou a konstrukčním materiálem zásadním prvkem pro tvorbu požadovaného tónu píšťaly. Horní zakončení těla určuje, zda se jedná o píšťalu otevřenou nebo uzavřenou. Otevřená píšťala obsahuje všechny harmonické složky v různé intenzitě, zatímco u krytých píšťal jsou potlačeny sudé harmonické složky. Existuje též varianta polokrytých píšťal, kde je posílena intenzita některých z harmonických i neharmonických složek ve spektru, a to pomocí nástavců či přidavných rezonátorů. Neméně důležitý je i tvar těla píšťaly. Kónicky sbíhavý tvar potlačuje vyšší harmonické, analogicky lze tedy tvrdit, že nálevkovitá píšťala bude vyšší harmonické složky posilovat. Pokud tyto tvary (částečně zeštíhlující, částečně rozšiřující) použijeme, je to zaručená cesta k získání netypických zvukových barev. Různorodé tvary se však v továrně konstruovaných nástrojích využívají zřídka, a to z několika důvodů, především díky podstatně vyšší výrobní ceně než je tomu u válcových či kónických píšťal, dále pak díky složitější zvukové pojivitosti s ostatními zavedenými rejstříky v nástrojích.
10. Směr vzduchového proudu k hornímu rtu píšťaly má vliv na nasazení i zabarvení tónu. V ideálním stavu se vzduchový proud rozráží z poloviny dovnitř a z poloviny ven. Pokud proud vzduchu směřuje více na vnější stranu rtu, bude ve výsledném tónu více vyšších harmonických složek i šumu, v obráceném případě dochází k posílení tónové části spektra a částečnému potlačení vyšších harmonických.
11. K přefukování tónů dochází, jsou-li splněny výše zmíněné podmínky, tedy nízký výřez, směr vzduchového proudu z vnitřní strany horního rtu a navíc i malé protilehlé otvory přibližně uprostřed aktivní délky píšťaly. Výsledkem je zvuk znějící o oktávu výše (ve spektru chybí 1. harmonická složka), v případě kryté píšťaly jde o zvuk znějící o duodecimu výše.

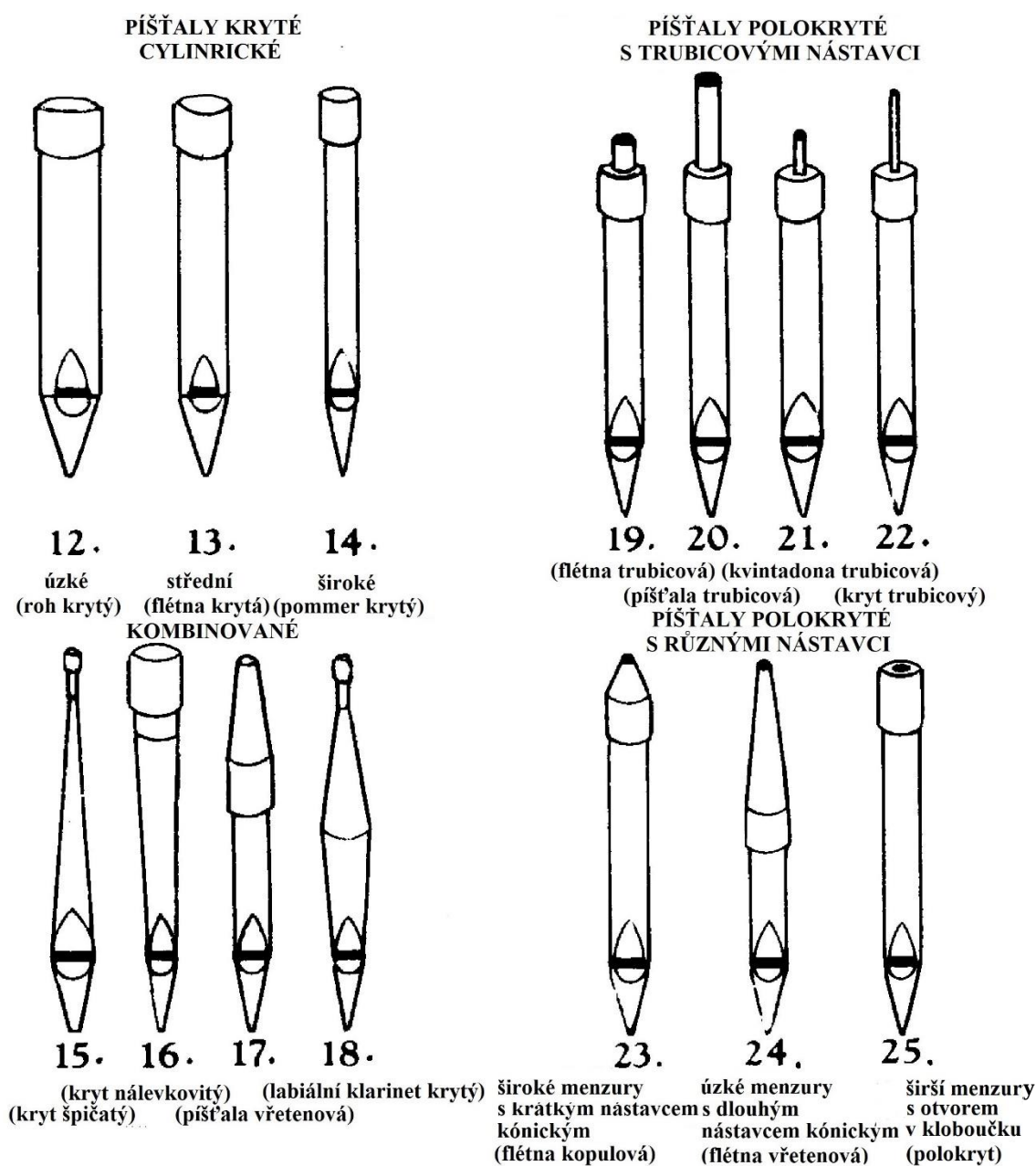
12. Po stranách výřezu se u některých konstrukcích píšťaly objevují tzv. přídavné vousy, které částečně ovlivňují výsledné ladění píšťaly, podílí se na lepším nasazení tónu a mají vliv na vyzařovací směrovou charakteristiku píšťaly.

### 2.1.3 Typické tvary retných varhanních píšťal

Na následujících obrázcích (2.3, 2.4) [12] jsou vyobrazeny tvary píšťal, které se běžně užívají v novostavbách nástrojů. Popisek pod číselným označením určuje menzuru píšťaly, v závorce je pak zvukový rejstřík, který se typicky z vybrané píšťaly ozve.



Obr. 2.3 Retné varhanní píšťaly otevřené



Obr. 2.4 Retné varhanní píšťaly kryté a polokryté

Kombinované tvary píšťal jsou v nástrojích zastoupeny v nepoměrně menším množství, než píšťaly kónické či cylindrické. Při konstrukci totiž bývá kladen největší důraz na zvukovou vyrovnanost zastoupených skupin píšťal, zvukově netypické píšťaly tuto vyrovnanost často narušují. Přestože se některé varhanní hlasy nazývají podle známých, běžně užívaných akustických nástrojů (viola, flétna, roh, klarinet), rozhodně neplatí, že se varhany snaží tyto nástroje autenticky napodobit či dokonce nahradit [12].

### 2.1.4 Menzurace retných píšťal

Menzura je vyjádření poměru délky píšťaly k jejímu průměru. Toto matematické vyjádření se však v praxi využívá pouze okrajově, neboť významně záleží na prostorové akustice místa, kde bude nástroj umístěn. Proto se volí tzv. volně variabilní menzurace, kdy je vhodnost menzury píšťaly experimentálně ověřena v různých akustických prostorách. Po určení vhodné menzury u prototypové píšťaly je však využito matematického aparátu pro získání konkrétních měr navazujících píšťal, potažmo jejich menzur.

Pro nastavení základního srovnání však lze využít tzv. normální menzury, která byla definována již v polovině 19. století profesorem J.G.Töpferem. Definice předpokládá, že pro nepozměněné zabarvení tónu dvou píšťal v intervalu 1 oktávy je průřez intonačně vyšší píšťaly ku průřezu hlubší píšťaly v poměru  $1:\sqrt[4]{8}$ . Pro názornost je uvedena rovnice s konkrétními tóny (2.1):

$$\frac{\text{průřez píšťaly } a^0}{\text{průřez píšťaly } A} = \frac{\text{průřez píšťaly } a^1}{\text{průřez píšťaly } a^0} = \frac{1}{\sqrt[4]{8}} \quad (2.1)$$

Protože je vhodnější v praxi počítat s průměrem, nikoliv průřezem, existuje odvozený výpočet (2.2):

$$\frac{\text{průměr píšťaly } a^0}{\text{průměr píšťaly } A} = \frac{\text{průměr píšťaly } a^1}{\text{průměr píšťaly } a^0} = \frac{1}{\sqrt[4]{8}} \quad (2.2)$$

Z tohoto vztahu lze odvodit, že každá 17. píšťala chromatické řady má poloviční průměr než píšťala výchozí pro tuto řadu při přibližném zachování zvukové barvy a tónového průběhu. Skutečná menzura vybraného hlasu je udávána v půltónech, které činí rozdíl mezi tónem píšťaly s průměrem určeným dle normální menzury a tónem zkoumané píšťaly, a to s přesností  $\pm$  čtvrttónu [12].

Šířka píšťaly je určena v poměru k obvodu píšťaly. Běžně se užívá šířka výřezu  $\frac{1}{4}$ , což označuje čtvrtinu obvodu píšťaly<sup>4</sup>. Výška výřezu je pak vyjádřena jako poměr k šířce výřezu.

---

<sup>4</sup> Obvod kruhu =  $\pi$  \* průměr

U kónických či nálevkovitých píšťal je zúžení, resp. rozšíření udáváno též jako zlomek, zde se jedná o poměr horního průměru ke spodnímu poměru.

Pokud se v rámci jedné rejstříkové řady přechází na jiný tvar píšťal nebo materiál, musí se adekvátně upravit i menzurace [12].

Menzura dřevěné kvadratické píšťaly vychází z výše uvedeného Töpferova výpočtu, kdy při zachování tónové barvy dvou cylindrických píšťal, jejichž základní tóny jsou vzdáleny o oktávu, je průřez těchto píšťal v poměru  $1:\sqrt{8}$ . Aby bylo možné určit povrch průřezu, je nutné upravit stávající vztah, a to následujícím způsobem (2.3):

$$S_{KVA} = a \cdot b \quad (2.3)$$

kde  $S_{KVA}$  označuje povrch průřezu kvadratické píšťaly,  $a$ ,  $b$  označuje délky stran. Je vhodné si vyjádřit poloměr  $r$ , a to ze vztahu pro průřez cylindrické píšťaly (2.4, 2.5, 2.6)

$$S_{CYL} = \pi \cdot r^2 \quad (2.4)$$

$$S = \pi \cdot r^2 = a \cdot b \quad (2.5)$$

$$r^2 = \frac{a \cdot b}{\pi} \quad (2.6)$$

kde  $S_{CYL}$  označuje povrch průřezu cylindrické píšťaly,  $r$  značí poloměr. Kvadratickou píšťalu lze převést na cylindrickou následujícím způsobem (2.7):

$$\emptyset = 2 \cdot r = 2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} \quad (2.7)$$

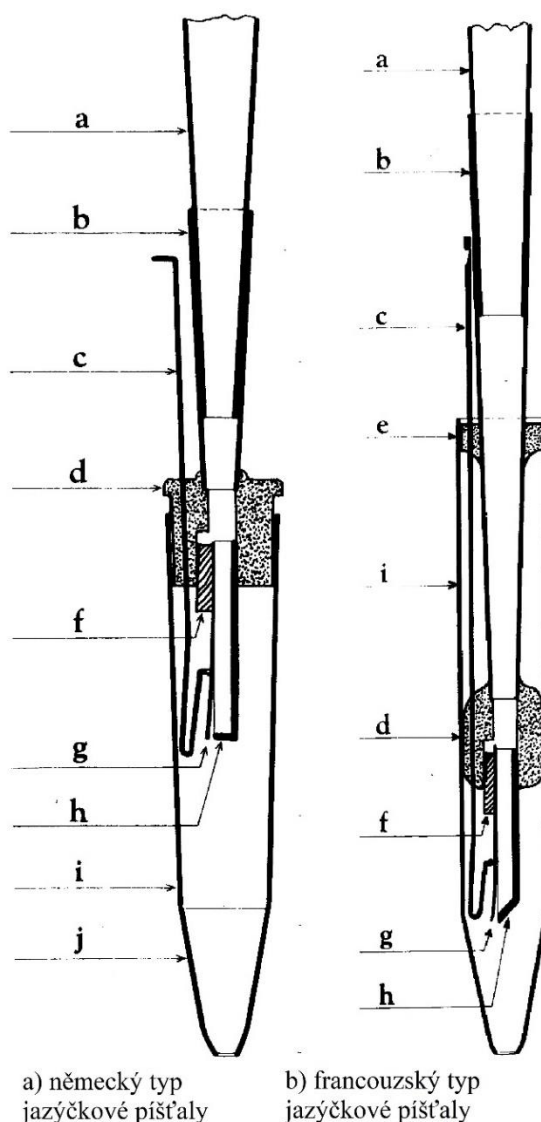
Délku těla píšťaly nelze spolehlivě určit pomocí tabulkové hodnoty, většina výrobců proto poskytuje tzv. délkovou lať, na které jsou příkladně uvedeny funkční délky zvoleného typu rejstříků, často obsahující drobnou rezervu pro případné ladění píšťaly.

Retná píšťala je v závislosti na konstrukčním materiálu více či méně náchylná na změny klimatu prostředí. Pokud je však klima prostoru neměnné či jen lehce proměnné, ladění retné píšťaly vykazuje dlouhodobou stabilitu. Naopak při významných výkyvech teploty, vlhkosti či tlaku vzduchu dochází k významným témbrovým i intonačním

změnám, např. zvýšení teploty okolního prostředí o nevelkou hodnotu způsobí snadno detekovatelné zvýšení tónu. Tato intonační změna je způsobena změnou hustoty kmitajícího vzduchového sloupce uvnitř těla píšťaly [12].

## 2.2 Píšťala jazýčková

Způsob konstrukce i vzniku tónu je u jazýčkové varhanní píšťaly znatelně odlišný od píšťaly retné. Konstrukční schéma a popis jednotlivých částí dvou základních typů jazýčkových píšťal je k vidění na obrázku (2.5) [12].



Obr. 2.5 Schéma a popis konstrukce retné varhanní píšťaly  
a) německého typu b) francouzského typu

Popis částí obrázku 2.1: a: ozvučnice (roztrub), b: lůžko ozvučnice, c: ladící drát (tyčinka), d: hlava, e: prsten, f: klín, g: jazýček, h: pouzdro, i: noha, j: špička nohy

### 2.2.1 Vznik tónu u jazýčkové píšťaly

Proud vzduchu, který prochází nohou píšťaly **i** a jazýčkovým pouzdrem **g** směrem do ozvučnice **a** přitiskne pružný jazýček **g** ke hraně pouzdra **h**, čímž se znemožní průchod vzduchu do ozvučnice. Přítlačná síla na jazýček přestane působit a celý dosavadní proces započne znovu. Tím se jazýček rozkmitá a vznikne tón, který ozvučnou vyzařuje ven a zároveň potlačuje neharmonické svrchní ruchy. Ozvučnice, spolu s ladícím drátkem, pouzdrem **i** jazýčkem je zasazena do hlavy píšťaly **d**. Podle typu provedení hlavy určíme, zda se jedná o verzi německé nebo francouzské (hlava + ořech **e**) jazýčkové píšťaly [12].

### 2.2.2 Základní teze o konstrukci jazýčkových píšťal

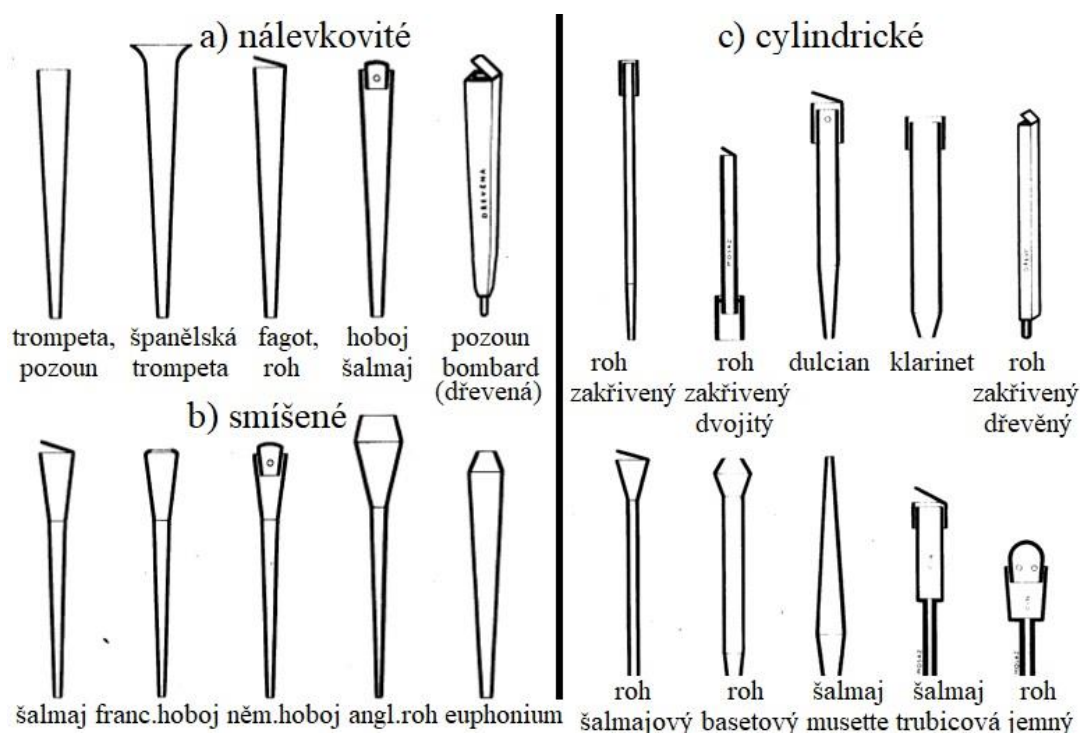
Pro získání správnou funkci jazýčkové píšťaly a získání požadovaného zvuku nástroje je vhodné znát několik elementárních pravidel [12] pro konstrukci jazýčkových píšťal.

1. Výšku tónu jazýčkové píšťaly určuje délka kmitajícího jazýčku. Ten je na jedné straně napevno uchycen. Čím delší je část kmitajícího jazýčku, tím hlubší je získaný tón, neboť s prodlužujícím jazýčkem se snižuje frekvence jeho kmitů. Délku jazýčku (resp. jeho kmitající části) lze snadno upravit ladícím drátem, který je zasazen do hlavy píšťaly. Tím lze poměrně jednoduše naladit píšťalu.
2. Zakřivení a šířka jazýčku, společně s tvorem jazýčkového pouzdra (viz Příloha A.1) ovlivňují barvu a charakter tónu, konkrétně podíl vyšších harmonických složek. Těch bude ve spektru více, je-li jazýček širší, nepřiliš tlustý a v klidné poloze jen s malým odklonem od pouzdra.
3. Častým materiálem pro výrobu pouzdra je mosaz. Takové pouzdro podle jiné kovového vyložení uvnitř podporuje (mosaz + tvrdé kovy) nebo potlačuje (mosaz + cín) množství a intenzitu vyšších harmonických složek.
4. K tónu, který je generován jazýčkem musí náležet odpovídající délka ozvučnice. V případě, že tomu tak není, dojde ke kvalitativnímu zhoršení výsledného tónu (tj. nepřirozenost, nekonkrétní nasazení, či přeskakování do jiného tónu). Speciální kategorií ozvučen jsou tzv. krátké regálové ozvučnice, které umožňují použití jazýčkových píšťal i u prostorově méně náročných nástrojů.

5. Tvar ozvučnice znatelně ovlivňuje barvu tónu píšťaly. Ozvučnice se dělí (podobně jako tvary retných píšťal) na nálevkovité, cylindrické, kombinované a výše zmíněné krátké regálové, které jsou tvarově rozličné a neortodoxní. Nálevkovitá ozvučnice se v tónovém spektru projeví zesílením prakticky všech harmonických složek v tónové oblasti (tj. 1-8. harmonická složka) spektra. Cylindrická ozvučnice zesiluje pouze liché harmonické složky (zde je možné spatřit analogii s krytými retnými píšťalami). Zkrácené regálové píšťaly (viz Příloha A.2) mají často délku poloviční či čtvrtinovou, a proto zesilují ty tóny harmonické řady, které odpovídají této délce, tedy až od druhé (resp. 4) harmonické složky spektra. Kromě osazení v nástrojích, které jsou poněkud menších rozměrů se tyto píšťaly využívají také pro zeslabení prvních harmonických složek spektra (nižších kmitočtů). Existují též ozvučnice prodloužené, ty naopak zesilují fundament a nižší harmonické složky, zvuk takových píšťal bude tedy basovější.
6. Délka nohy jazýčkové píšťaly má vliv na rychlé a přesné nasazení tónu, u rejstříků se spektrem bohatým na vyšší harmonické však proměňuje i tónový charakter. Aby bylo zaručeno rychlé nasazování a odsazování tónu, objevuje se v jazýčkových píšťalách s dřevěnou nohou papírová membrána a v píšťalách s kovovou nohou malý otvor pro rychlý pokles tlaku vzduchu uvnitř píšťaly.
7. Radiátorem jazýčkové píšťaly je otevřený konec ozvučnice (čímž se významně liší od retné píšťaly, kde zvuk nejintenzivněji vyzařuje z výrezu). Z toho důvodu mohou být ozvučnice píšťal u některých nástrojů zalomeny o 90°, aby vyzařovaly směrem k posluchačům.

### 2.2.3 Typické tvary jazýčkových varhanních píšťal

Nákresy jednotlivých typů ozvučen jazýčkových píšťal zobrazuje obrázek (2.6) [12]:



Obr. 2.6 Nálevkovité, kombinované a cylindrické ozvučnice jazýčkových varhanních píšťal

Tvar ozvučnice přímo souvisí s výsledným zvukem píšťaly (viz podkapitola 2.2.2., bod 5). Konkrétní vliv na tóny spektra mají rozměry píšťaly a materiál, ze kterého je ozvučnice zhotovena.

### 2.2.4 Menzurace jazýčkových píšťal

Menzurace jazýčkové píšťaly začíná nejdříve výběrem vhodné hlavy a pouzdra. Poté se volí míry jazýčku, často podle menzur daných explicitními tabulkami. Dále se samostatně menzurují proměnlivé míry ozvučen, a to na základě prostoru, zvukové barvy a menzuraci ostatních píšťal v nástroji a dalších faktorů. U nálevkových ozvučen se udává horní a dolní průměr, u cylindrických je to univerzální průměr, u kombinovaných průměry v různých místech ozvučnice a vzdálenost mezi těmito průměry. Významnou roli hraje i volba materiálu ozvučnice, kde se často kombinuje vícero materiálů v jednu slitinu.

V praxi se pro menzuraci využívá služeb specializovaných společností, které dodávají zhotovené jazýčky, hlavy, dokonce i celé píšťaly. Systém menzurace a výroby jazýčkových píšťal u specializované externí společnosti dnes využívá většina varhanářských firem [12].

#### **2.2.5 Nárazná vs. průrazná jazýčková píšťala**

Všechny doposud uvedené informace o jazýčkových píšťalách se týkají píšťal s nárazným jazýčkem, což znamená, že délka kmitající části jazýčku přechází přes hranu jazýčkového pouzdra. O tuto hranu pak naráží => kmitá pouze jedním na jednu stranu od hrany pouzdra.

Naproti tomu však existují píšťaly s průrazným jazýčkem, kde je délka jazýčku v podstatě stejná jako otvor v jazýčkovém pouzdře, jazýček tedy kmitá oboustranně od klidové polohy (stejným způsobem vzniká tón i u harmonií či harmonik, proto i zvuk těchto píšťal připomíná tyto nástroje). U takových píšťal mají ozvučnice na výsledný zvuk menší vliv, protože amplituda jazýčku je menší než u nárazného jazýčku, a kmity se hůře přenášejí do rezonátoru.

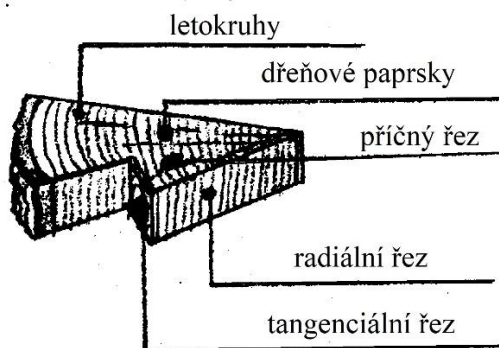
U nástrojů s tímto druhem píšťal se však ukázalo, že se tyto intonačně pojí s ostatními zvukovými rejstříky jen za předpokladu, že je teplota v prostoru stejná, jako v době jejich naladění. Kromě toho je zvuková barva těchto píšťal velmi odlišná od retných či nárazných jazýčkových píšťal, a proto se v nově konstruovaných nástrojích tento typ píšťal prakticky nevyskytuje [12].

### 3. MECHANICKÉ A AKUSTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO VÝROBU PÍŠŤAL

Následující kapitola popisuje některé druhy dřeva, kovů a syntetických látek jako vhodné materiály pro výrobu varhanních píšťal. Vhodnost těchto materiálů pro výrobu jakýchkoliv akustických nástrojů popisují jejich mechanické a akustické vlastnosti, které mají zásadní vliv na výsledný zvukový témbra, odolnost i trvanlivost zhotoveného nástroje.

#### 3.1 Vlastnosti dřeva

Dřevo je pevná a pórovitá rostlinná tkáň, který je znám svou anizotropií (stavební prvky jsou orientovány určitým směrem). Některé druhy dřeva však mohou být i tzv. ortotropní (stejně vlastnosti stavebních prvků v některých vzájemně kolmých směrech). Mechanické vlastnosti dřeva lze zkoumat ve třech rovinách: příčné, podélné tangenciální a podélné radiální (obr. 3.1) [1][7][16].



Obr. 3.1 Struktura dřeva v různých rovinách

Dřevo se skládá ze dvou základních stavebních prvků v různém poměru, z celulóзовých vláken a ligninu (pojivo celulóзовých vláken), v malé míře jsou zastoupeny i jiné (např. minerální) látky. Dle mikroskopického zkoumání stavby dřeva lze zjistit některé jeho vlastnosti, např. pevnost či sesychání. Pro určení takových vlastností je třeba znát tvary, druhy a rozměry buněk a jejich vzájemné uspořádání. Makroskopické pozorovací znaky pomáhají rozlišit druh, ba i konkrétní dřevinu pomocí vzhledu (letokruhů, barvy vnitřní

struktury atd.). Charakteristickým znakem jehličnatého dřeva je přítomnost pryskyřičných kanálků (s výjimkou jedle, jalovce a tisu a jednoduchou stavbou dřevní hmoty, přítomnost tracheid (sloužících k rozvodu vody a vyztužení stromu). Listnaté dřevo je jednoznačně rozpoznatelné díky přítomnosti trachejí – cév, které jsou pozorovatelné jako póry na příčném řezu a jako malé rýhy na řezech podélných. Naopak nikdy neobsahuje pryskyřičné kanálky. Dřevo lze dále rozdělit na tvrdé a měkké. Tvrdá dřeva pocházejí většinou z listnatých stromů, jsou pevnější, mají vyšší hustotu a jsou trvanlivější. Měkká dřeva pocházejí z obvyklých jehličnanů, jsou snadněji opracovatelná, obvykle však začínají hnít dříve než dřeva tvrdá. Přesné rozdíly mezi definicí tvrdého a měkkého dřeva zahrnuje norma ČSN 49 1010. Po utnutí stromu a jeho rychlém zpracování je kmen syrového stromu stále nasycen vodou. Takové dřevo obsahuje 40–80 % vody a není vhodné pro okamžité zpracování na různé dřevařské výrobky. Po přirozeném vysušení ve dřevě zůstane asi 20% vlhkosti. Navlhavost je schopnost dřeva absorbovat vodní páru z okolního vzduchu. Nejobjemnější množství vody, které dokáže dřevo absorbovat, je složeno z maximální hodnoty vody volné (vyplňující dutiny ve dřevě) a vázané (obsažené v dřevní hmotě a vláknech). Při vysoušení se tedy nejdříve odpařuje vlhkost volná, poté vlhkost vázaná. Odpařuje-li se vlhkost vázaná (snížení nasycení dřevních vláken), dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti a ke snížení elektrické a tepelné vodivosti. Pokud dřevo střídavě vlhkost pohlcuje a odpařuje, označujeme tento jev jako „pracování dřeva“. Nejméně dřevo pracuje ve směru podélném (cca 0,2 %), o něco více ve směru podélném radiálním (cca 5 %), nejvíce pak ve směru podélném tangenciálním (tzv. po letokruzích), kde dochází ke změně v sesychání až o 10 %). Správné vlhkosti dřeva pro potřebu výroby varhanních píšťal lze docílit vysušením dřeva v sušárně [1].

Akustická charakterizace dřeva je souborem vlastností, zahrnujících vodivost zvuku ve dřevě, útlum, zvukovou pohltivost a odrazivost, rezonanci, průzvučnost a do jisté míry i zvukový tón. Vhodný rezonanční materiál má letokruhy vzdáleny od sebe 1–2 mm. V dřevní hmotě je vysoký podíl tracheid, které jsou seskupeny do pravidelných řad, čímž zvyšují pružnost dřeva. Takový kus pak lépe odolává vnějším silám (zatížení, namáhání v ohybu či v tlaku), kdy působí vnitřní síly vazeb mezi atomy, které se nazývají napětí, což je poměr síly a obsahu (povrchu) plochy, na kterou tato síla působí.

Míra největšího napětí, které látka snese, aniž by došlo k porušení se nazývá pevnost. Lze ji dělit dle druhu namáhání, tedy v ohybu, ve smyku a v tlaku. Vlastnost materiálu navrátit se po vychýlení a uvolnění zpět do původního tvaru je označována jako pružnost. Tato vlastnost se projevuje jen po tzv. mez pružnosti, nad ní pak dochází k deformacím [1].

Dřevo dobře vede zvukové vlnění, a to nejen v mezích slyšitelného pásma (20 Hz – 20 kHz), ale i mimo tuto hranici (pod 20 Hz i nad 20 kHz). Zvuk jako mechanické vlnění prostředí lze charakterizovat vlnovou délkou, kmitočtem, periodou, amplitudou vlnění a rychlostí a směrem šíření v prostoru. Rychlost šíření zvuku ve dřevě (resp. v různých materiálech) uvádí vztah (3.1) [13][16]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.1)$$

kde  $E$  značí Youngův modul pružnosti v tahu [MPa],  $\rho$  objemovou hustotu dřeva [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

Youngův modul pružnosti v tahu lze určit jako poměr napětí a deformace, kterou toto napětí vyvolalo (3.2) [7].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

kde  $\sigma$  označuje napětí v tahu [MPa] a  $\varepsilon$  je způsobená deformace, kterou lze matematicky vyjádřit jako (3.3):

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.3)$$

kde  $l$  je prodloužená délka [m] a  $l_0$  je původní délka [m].

Akustická (též vyzařovací) konstanta je elementárním ukazatelem, jak moc dobře dovede vybraný vzorek dřeva rezonovat (3.4):

$$A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (3.4)$$

Rezonance dřeva se často měří pomocí vzorků ve tvaru tyče. Pokud je tyč umístěna ve středu při buzení podélných vln, pak modul pružnosti této tyče lze vypočítat vztahem (3.3) [16]:

$$E = 4 \cdot f_r^2 \cdot l^2 \cdot \rho \quad (3.5)$$

kde  $f_r$  je základní rezonanční frekvence vzorku [Hz],  $l$  je délka tyče [m] a  $\rho$  objemová hustota dřeva [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Z tvaru rezonanční křivky lze pak vypočítat logaritmický dekrement útlumu  $\delta$  (3.6):

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_r} \quad (3.6)$$

Kde  $f_1 - f_2$  je šířka rezonanční křivky, kdy klesne amplituda rezonance na 50 %.

Pro akustickou impedanci  $Z$ , kterou lze označit též jako vnitřní tření platí vztah (3.7) [7]:

$$Z = \rho \cdot c \quad (3.7)$$

K výrobě velkých těl píštal ze dřeva se nejčastěji používá dřevo smrkové či borovicové, na předkrývky nebo celou přední stěnu pak dřevo tvrdé (obvykle dub), malé píštal se pak vyrábí z tvrdého dřeva (nejčastěji javorového nebo dubového).

## 3.2 Vlastnosti kovů

Kovy jsou jednou z hlavních skupin chemických prvků. Jedná se o prvky s krystalickou strukturou, jejichž atomy jsou spojeny tzv. kovovou vazbou. Kovy jsou uspořádány do polykrystalů (samotné krystaly mají pevnou strukturu, avšak poloha jednotlivých krystalů je náhodná), tudíž se jedná o izotropní látky, což znamená, že kovy mají ve všech směrech stejné vlastnosti. Ze všech známých chemických prvků tvoří kovy nejrozšířenější skupinu (asi tři čtvrtiny všech prvků). Pro své fyzikální a mechanické vlastnosti a poměrně snadné zpracování bývají velkou měrou využívány v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Výborně vedou teplo i elektřinu, jsou tažné a kujné a většinou mají dobrou teplotní odolnost (je třeba vysokých teplot pro jejich tání či dosáhnutí bodu varu) [1].

Kovy se v přírodě vyskytují nejčastěji v podobě oxidů, výjimečně lze narazit i na kovy v ryzím stavu (takové kovy se pak používají např. v klenotnictví, neboť nemají tendenci korodovat). Jednotlivé směsi ve kterých je obsažen více než jeden prvek, přičemž alespoň jeden z nich je kov, jsou označovány jako slitiny kovů [3].

Slitiny kovů spojují výhody obsažených prvků, čímž rozšiřují jejich využití pro další průmyslová odvětví. Pro výrobu varhanních píšťal se často používá slitina olova a cínu v rozdílném poměru (od 25 % do 75 % cínu ve slitině). Mezi základní vlastnosti cínu patří vynikající tažnost, nízká teplota tavení a odolnost proti korozi. Do jisté míry se vlastnosti cínu a olova prolínají, olovo má též nízký bod tavení, snadno se tvaruje a je odolné vůči korozi. Z dalších vlastností olova stojí za zmínku vysoká hustota, která má vliv na útlum zvukových vln v píšťale, na druhou stranu však snižuje jejich mechanickou pevnost. Cínoolovená slitina již nepotřebuje dalších příměsí, v tomto složení je vhodná ke konstrukci těla píšťal [1]. Lze narazit i na píšťaly ze zinku či mosazi. U trumpetových rejstříků (jazyčkové píšťaly) bývá ozvučnice vyrobena z měděného plechu.

### 3.3 Vlastnosti umělých hmot

Ačkoliv nebývá zvykem, že bychom ve zkonstruovaných nástrojích našli umělohmotné píšťaly, je na místě poukázat na dlouhodobé používání těchto materiálů např. pro výrobu různých typů fléten.

Typickým příkladem takové látky je Akrylonitrilbutadienstyren, známější pod zkratkou ABS. Tento plast byl vyvinut během válečných výzkumů a roku 1948 byl patentován. Obvykle lze ve složení ABS nalézt styren, butadien a akrylonitril v poměru 2:1:1. Vyniká svou tuhostí, tvrdostí a odolností (o čemž svědčí poměrně vysoká pevnost v tahu. Neupravený plast je neprůhledný, má lesklý vzhled a bílou barvu [5].

V rámci praktické konstrukce experimentálních píšťal byly zvoleny materiály pro výrobu hudebních nástrojů netradiční, např. měkčené PVC. Tato amorfnní látka vzniká přidáním změkčovadel do pevného polyvinylchloridu, což je plast celosvětově rozšířený, a to v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Přestože je PVC bezbarvé, bývá často dobarvováno [6].

Pro některé konstrukční součásti jazyčkové varhanní píšťaly byl použit materiál Polyethylene terephthalate, známější pod označením PET. Tento materiál typický pro

lahve a obaly. Modul pružnosti v tahu nabývá spíše průměrné hodnoty a při protržení je tento materiál vysoce deformativní [6].

### 3.4 Tabulkové hodnoty výrobních materiálů

Pro výpočet rychlosti zvuku, modulu pružnosti v tahu, akustickou konstantu, logaritmický dekrement útlumu a vnitřního tření poslouží výše uvedené vztahy (3.1) až (3.4), (3.6) a (3.7). Orientační hodnoty modulu pružnosti v tahu a hustoty materiálů lze snadno získat z tabulek materiálových vlastností [4][5][6][14]. Pro materiály vhodné k výrobě varhanních píšťal (smrk, borovice, slitiny cínu a olova, zinek a měď) i materiály experimentální (výše uvedené umělé hmoty) jsou tyto hodnoty uvedeny v následující tabulce (3.1).

Tabulka 3.1 Hodnoty modulu pružnosti v tahu a hustoty látek

|                       | <b>Modul pružnosti v tahu<br/>[GPa]</b> | <b>Hustota<br/>[kg.m<sup>-3</sup>]</b> | <b>Rychlost zvuku<br/>v materiálu [m.s<sup>-1</sup>]</b> |
|-----------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| smrk                  | 11 (0,55) <sup>5</sup>                  | 470                                    | 4837 (1081) <sup>6</sup>                                 |
| borovice              | 12 (0,46) <sup>5</sup>                  | 520                                    | 4803 (941)                                               |
| cín + olovo (50 % Sn) | 33                                      | 9325                                   | 1881                                                     |
| cín + olovo (70 % Sn) | 40                                      | 8519                                   | 2167                                                     |
| cín + olovo (75 % Sn) | 41,5                                    | 8318                                   | 2234                                                     |
| zinek                 | 108                                     | 7140                                   | 3889                                                     |
| měď                   | 130                                     | 8960                                   | 3809                                                     |
| ABS                   | 2,5                                     | 1010                                   | 1573                                                     |
| měkčené PVC           | 0,035                                   | 1235                                   | 168,3                                                    |
| PET                   | 2,9                                     | 1339                                   | 1471                                                     |

<sup>5</sup> Hodnota mimo závorku značí modul pružnosti rovnoběžně s dřevěnými vlákny, hodnota v závorce označuje modul pružnosti kolmo na vlákna dřeva.

<sup>6</sup> Hodnota mimo závorku značí rychlost zvuku rovnoběžně s dřevěnými vlákny, hodnota v závorce označuje rychlost zvuku kolmo na vlákna dřeva.

Hodnoty modulu pružnosti a hustoty pro cínoolověnou slitinu byly stanoveny z hodnot modulů pružnosti pro obsažené prvky vztahem (3.8)<sup>7</sup>:

$$E_{Sn+Pb} = \frac{\text{procentní obsah Sn} \cdot E_{Sn} + \text{procentní obsah Pb} \cdot E_{Pb}}{100} \quad (3.8)$$

kde  $E_{Sn}, E_{Pb}$  označuje Youngův modul pružnosti v tahu pro cín (Sn) a olovo (Pb).

Uvedené hodnoty poslouží jako výchozí pro matematickou simulaci korpusů píšťal a výpočet rezonančních modů.

---

<sup>7</sup> Pro výpočet hustoty platí vztah 3.8 za předpokladu nahrazení tabulkových hodnot  $E$  tabulkovými hodnotami  $\rho$ .

## 4. ANALÝZA ZVUKU VYBRANÝCH VARHANNÍCH PÍŠŤAL

Na zvuk vybraného hudebního nástroje je možné nahlížet dvojím způsobem, a to subjektivně nebo objektivně. V předešlých kapitolách byly již několikrát zmíněné pojmy, jako témbra, tónová dynamika, tónová poloha nebo rychlost a přesnost nasazení. Tato označení, společně s psychickým vnímáním a působením hraného tónu jsou funkčními vodítky k získání jednoduchého zvukového rozboru. Takový rozbor je však značně subjektivní, což znamená, že výsledek rozboru a posouzení stejného zvukového vzorku skupinou posluchačů velmi často přinese různé výsledky. Aby bylo možné tyto výsledky využít pro výzkum či veřejnou prezentaci, lze tak učinit dvojím způsobem, buďto shrnout výsledky skupiny analyzujících posluchačů do tabulek a grafů, čímž lze určit pomocí vzájemného srovnání různé vlastnosti zvukového vzorku, nebo využít možnosti převodu získaného zvukového vjemu do číselné podoby, která by objektivně odpovídala výsledkům získaným subjektivní metodou.

### 4.1 Definice zvukového vlnění

Vlnění označuje kmitavý pohyb v pružném prostředí, kde jsou všechny částice prostředí vázány pružnými vazbami. To způsobuje řetězovou reakci, kdy tyto částice uvádí do pohybu vedlejší částice, se kterými je pojí již zmíněná pružná vazba [16].

Veličina popisující uraženou vzdálenost zvukové vlny během jedné periody se nazývá vlnová délka [m]. Matematicky lze vyjádřit vlnovou délku vztahem (4.1) [16]:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (4.1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření v pružném prostředí,  $f$  je kmitočet vlnění a  $T$  je doba jedné periody.

### 4.2 Spektrální analýza

#### 4.2.1 Popis spektra

Každý periodický i neperiodický signál, je rozložitelný na dílčí počet harmonických složek, jejichž frekvence je celočíselným násobkem fundamentu (1. harmonické složky).

Tato řada byla poprvé popsána v 1. polovině 19. století francouzským fyzikem Jeanem Baptistou Fourierem a vyjadřuje ji vztah (4.2) [15].

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t) \quad (4.2)$$

kde  $a_0$  označuje stejnosměrnou složku,  $a_k, b_k$  koeficienty amplitudy alikvótních tónů, jejichž kmitočet bude  $k \cdot \omega_1$ , kde  $k$  se rovná pořadovému číslu harmonické složky. Proměnná  $t$  označuje čas

Pro výpočet koeficientu  $a_0$  slouží vztah (4.3):

$$a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) dt \quad (4.3)$$

Koeficienty amplitudy  $a_k, b_k$  lze vyjádřit následující vztahy (4.4, 4.5) [15]:

$$a_k = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \cos(k\omega_1 t) dt \quad (4.4)$$

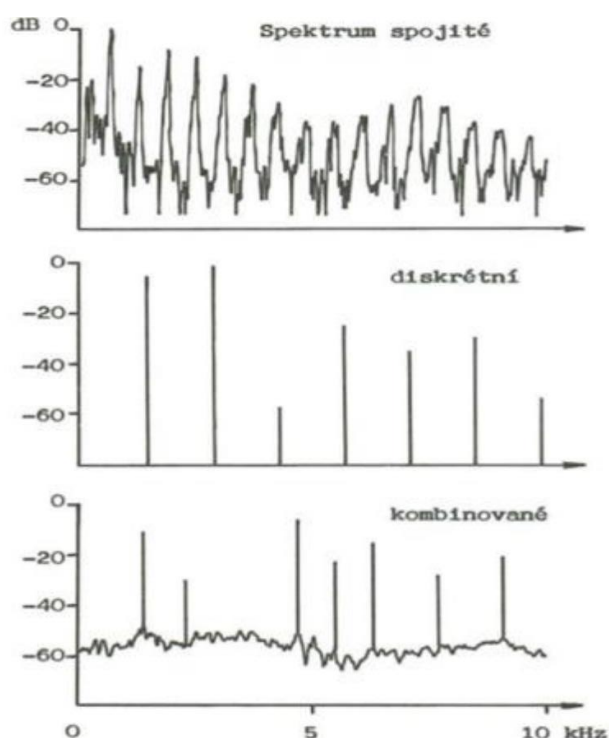
$$b_k = \frac{2}{T_1} \int_0^T s(t) \sin(k\omega_1 t) dt \quad (4.5)$$

kde  $T$  označuje periodu signálu [15].

Spektrum se vyobrazuje pomocí dvou os, kde se na horizontální ose nachází kmitočet a na vertikální ose amplituda. Takové spektrum bývá vyjádřeno buďto spojitě, kdy je hodnota signálu vyjádřena v každém bodu, diskrétně, kdy je signál zakreslen jen v určitých bodech a kombinované, kdy je hodnota signálu definována v okolí daných bodů. V trojrozměrném zobrazení pak třetí rozměr vyjadřuje čas [16].

Pro zjištění číselných hodnot je využito softwaru Matlab, ve kterém je na získané vzorky se zvukovým signálem aplikován algoritmus FFT (Fast Fourier Transform). Dále bylo provedeno váhování Hannovým oknem, aby byly eliminovány vzniklé čáry ve vykreslení spektra, které se zde objevily vlivem nespojitosti znovu spojených krátkých úseků signálu po diskrétní Fourierově transformaci.

Zobrazené spektrum bývá často rozděleno do 3 spektrálních oblastí. První z těchto oblastí, která je vymezena 1. až 8. harmonickou složkou, se nazývá oblast intervalová, kdy je možné jednotlivé harmonické složky rozpoznat pouhým sluchem. Druhá oblast je definována zpravidla mezi 8. – 16. harmonickou složkou, tato oblast se nazývá klastrová, zde se vzdálenost mezi jednotlivými složkami výrazně zkracuje, pořád však lze rozpoznat jednotlivé tóny ve spektru. Ve třetí oblasti, vymezené asi od 16. harmonické složky výše však přestává být dost dobře možné rozeznat jednotlivé harmonické složky. Toto pásmo bývá označováno jako šumové nebo mikrointervalové [11].



Obr. 4.1 Typy zobrazení spektra [18]

#### 4.2.2 Spektrální centroid a roll-off

Pro popis charakteru spektra lze využít tzv. spektrální centroid, jehož hodnota je vyjádřením energetického těžiště ve spektru. Lze jej definovat vztahem (4.6)

$$SpC = \frac{\sum_{k=1}^N f(k)c(k)}{\sum_{k=1}^N c(k)} \quad (4.6)$$

..

kde  $c(k)$  označuje intenzitu spektrálních koeficientů a  $f(k)$  střední kmitočet.

Spektrální roll-off pak definuje kmitočet, pod kterým je soustředěna předem nastavená poměrná část celkové energie ve spektru (vyjádřena v procentech), čili: (4.7)

$$\sum_{k=1}^{f_s} c(k) = p \sum_{k=1}^N c(k) \quad (4.7)$$

kde  $f_s$  vyjadřuje střední kmitočet části spektra, ve které je koncentrováno zvolené procentuální množství energie  $p$ , která se často pohybuje 0,85 až 0,95 a lze ji využít jako dělící bod mezi tónovou a šumovou složkou spektra [17].

#### 4.2.3 Definice a výpočet psychoakustických veličin

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, aby bylo možné porovnat kvalitu a vlastnosti analyzovaných zvukových vzorků. Proto jsou na tyto vzorky v rámci analýzy aplikovány výpočty některých psychoakustických veličin, které umožňují takové srovnání provést, konkrétně pak jasnosti a tonality.

**Jasnost tónu** lze vypočítat jako podíl spektrálních složek dle vztahu (4.8)

$$BR = \frac{\sum_{k=1}^n k c_k}{c_0 + \sum_{k=1}^n c_k} \quad (4.8)$$

kde  $n$  je počet spektrálních složek,  $c_k$  je velikost  $k$ -té spektrální složky a  $c_0$  je prahová hodnota pro uznání užitečné spektrální složky. Jasnost se svým vyjádřením podobá spektrálnímu centroidu, ten se však vztahuje ke všem spektrálním složkám, kdežto jasnost pracuje pouze s „užitečnými“ spektrálními složkami, tedy takovými, které se nachází v užitečném pásmu (zpravidla do kmitočtu 12 – 13 kHz) [17].

**Tonalita** je určena na základě tzv. spektrální plochosti, vypočítané poměrem geometrického a aritmetického průměru spektrální hustoty výkonu. Tonalita je bezrozměrná veličina, kterou je pro lepší uchopitelnost vhodné přepočítat na procenta. Pro jednoduchý harmonický průběh by měla tonalita atakovat maximální možnou hodnotu, což je 100 %.

Nutno podotknout, že nejde o obecně platnou definici, nýbrž o jeden mnoha způsobů zisku výsledku. Většinou se však jedná o poměr harmonických složek ku neharmonickým v rozdílných šířkách kmitočtových pásem [17].

#### 4.2.4 Lineární prediktivní kódování

LPC metoda (Linear Predictive coding) slouží k rozboru především digitálně zpracovaných hlasových signálů, přesněji řečeno ke stanovení formantových (rezonančních) oblastí<sup>8</sup>. Spočívá v predikci vzorku signálu na základě předchozích  $p$  vzorků (4.9).

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k), \quad (4.6)$$

kde je  $\hat{s}(n)$  odhad  $n$ -tého členu v posloupnosti dané lineární kombinací  $p$  (počtu LPC koeficientů) a  $\alpha_k$  označuje predikční koeficienty. Je vhodné nalézt takové predikční koeficienty, aby byla lineární kombinace předchozích vzorků co nejbližší k hodnotě signálu. Výsledkem je jakási obálka analyzovaného spektra, přičemž její vyhlazení je ovlivněno predikčním řádem  $p$  [17].

### 4.3 Postup měření

#### 4.3.1 Měřený nástroj

Zvukové vzorky použité pro spektrální analýzu byly získány nahráváním varhan, které vyrobila krnovská firma Rieger-Kloss. Tento konkrétní nástroj byl zkonstruován v letech 1970–1971, nese opusové číslo 3387 a je umístěn v rytířském sále brněnské Nové radnice. Tyto varhany používají pro spojení varhanního stolu a píšťal využívají od roku 2001 elektrickou trakturu, hra na ně je tedy velmi přesná a možnost volby rejstříkových kombinací nastává bez jakéhokoliv zpoždění. Systém je řízen mikroprocesorem, transpozicí, elektrickým ovládáním žaluzií i systémem až nastavitelných rejstříkových kombinací, jedná se tak o nástroj s velmi moderní konstrukcí [10].

#### 4.3.2 Složení nahrávacího řetězce

Pro analýzu zvukových vzorků bylo využito měřicího mikrofону renomované značky NTi Audio typu M4260 a zvukové karty (A/D převodníku) Focusrite 18i8. Pro záznam

---

<sup>8</sup> Formantová oblast – lokální maximum u složených tónů ve spektru, vznikající rezonancí dutin (při zpěvu typicky nosní, ústní, u nástrojů pak činné tělo nástroje)

vzorků byl využit DAW Cubase LE AI 9.5. Měřicí mikrofon byl zkalibrován pomocí tónového kalibrátoru Brüel & Kjær typu 4231 (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Složení měřicího řetězce

Pro matematickou analýzu a grafické zobrazení spektra bylo vytvořeno či částečně modifikováno [17] několik funkcí v prostředí Matlab, kdy v první z těchto funkcí dojde po vyzvání a výběru kalibračního a analyzovaného zvukového vzorku k výpočtu hodnot 1. až 9. harmonické složky a výpočtu celkové hladiny akustického tlaku, ve druhé funkci se opět po vyzvání výběru zvukového souboru zobrazí spojitě modulové spektrum zvukového vzorku. Další funkce numericky určuje spektrální centroid, roll-off a tonalitu a poslední skript provádí pro zadané vzorky metodu LPC pro zjištění formantových oblastí, potažmo rezonančních modů.

## 4.4 Popis naměřených hodnot

### 4.4.1 Analyzované píšťaly

Pro měření a analýzu byly zvoleny čtyři píšťaly z výše uvedeného nástroje. Vzorky retných píšťal byly pořízeny na znějícím tónu  $c_0$  (130,81 Hz), a přestože jsou dva vzorky

kovové a svými fyzickými parametry velmi podobné (cylindrický tvar či totožný výrobní materiál), odlišnosti mezi nimi lze detekovat velmi dobře. Třetí z analyzovaných retných píšťal je dřevěná, kvadratická a krytá, tvoří tedy jakýsi protipól k prvním dvěma vzorkům. Poslední analyzovaná píšťala používá k tvorbě tónu jazýček a její rozbor je proveden na tónu  $c_2$  (524 Hz). Tato píšťala je svou konstrukcí a zvukovým charakterem zcela odlišná od předchozích vzorků. Cílem spektrální analýzy je potvrdit předpoklady vlivu rozměrů, materiálu a konstrukčních prvků, popsanych ve druhé kapitole.

První analyzovanou píšťalou je Oktáva 4'. Zvukově se v podstatě jedná o Principál, zní však o oktávu výše než je hráno (základní kmitočet je dvojnásobkem základního kmitočtu hraného tónu). Když je tedy na varhanním stole stisknut tón  $c_0$ , zní ve skutečnosti tón  $c_1$ . Píšťala je válcového tvaru, vyrobena z cínoolověné slitiny v poměru 70 % cínu ku 30 % olova. Činná délka píšťaly (rezonátoru) je 1053 mm a průměr 72 mm, tloušťka plechu se rovná 1 mm (obr. 4.3) [10].



Obr. 4.3 Píšťala Oktáva 4'

Druhou z vybraných vzorků píšťal je Chorálbas 4'. Jedná se opět o píšťalu z cínoolověné slitiny, tentokrát jsou však zmíněné dva prvky v poměru 1:1, což je na první pohled patrné. Píšťala je oproti předchozí, matná a neopracovaná, díky vyššímu obsahu olova by měla být i měkkší. Je opět válcového tvaru s délkou rezonátoru 1100 mm a průměrem 85 mm a tloušťkou plechu 1 mm (obr. 4.4) [10].



Obr. 4.4 Píšťala Chorálbas 4'

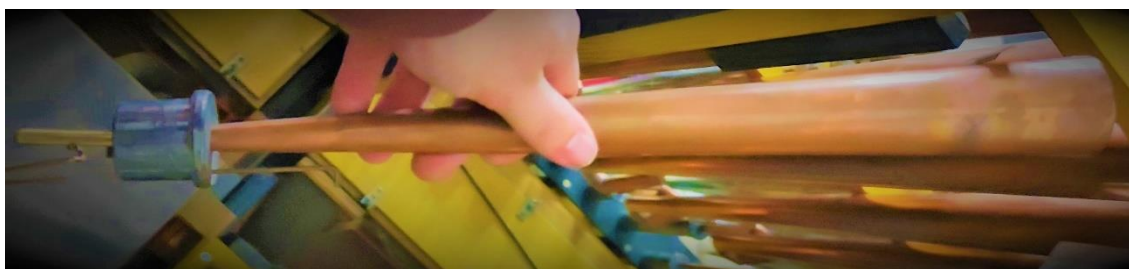
Třetí píšťala, u které byl proveden rozbor je od předchozích značně odlišná. Jedná se o píšťalu rejstříku Pommer 16', který slouží jako basový hlas k méně intenzivním

a flétnovým rejstříkům. Konstrukce píšťaly je kvadratická, jako výrobní materiál je zde použito borovicové dřevo. Píšťala je na jednom konci krytá, délka rezonátoru by měla být oproti předchozím vzorkům asi poloviční, dá se tedy předpokládat, že ve spektru budou potlačeny liché harmonické složky. Činná délka rezonátoru je 540 mm, což je skutečně přibližně polovina činné délky předchozích dvou vzorků. Vnitřní rozměry dutiny jsou 45 na 52 mm. Převod na kruhový průměr byl proveden pomocí vztahu (2.7). Hodnota kruhového průměru této píšťaly byla stanovena na 54,6 mm. Tloušťka stěny píšťaly je 10 mm (obr. 4.5) [10].



Obr. 4.5 Píšťala kvadratická dřevěná (ilustrační foto)

Pro explicitní porovnání retných a jazýčkových píšťal byla do skupiny analyzovaných píšťal přidána píšťala zvukového rejstříku Trompeta. Trompetové a pozounové rejstříky mají často ozvučnu vyrobenou z měděného plechu, ani tento vzorek není výjimkou. Tloušťka tohoto plechu byla stanovena na 0,3 mm, spodní průměr nálevky je 10 mm, horní průměr 41 mm a výška nálevky činí 360 mm. Jazýček této píšťaly je vyroben z fosforo-bronzového plechu o tloušťce 0,2 mm a jeho činná délka je rovna 20 mm. Pouzdro je celomosazné o průměru 10 mm (obr. 4.6).



Obr. 4.6 Píšťala Trompeta jazýčková

Hodnoty všech podstatných rozměrů analyzovaných píšťal jsou pro přehlednost zaneseny do následující tabulky (4.1) [10]

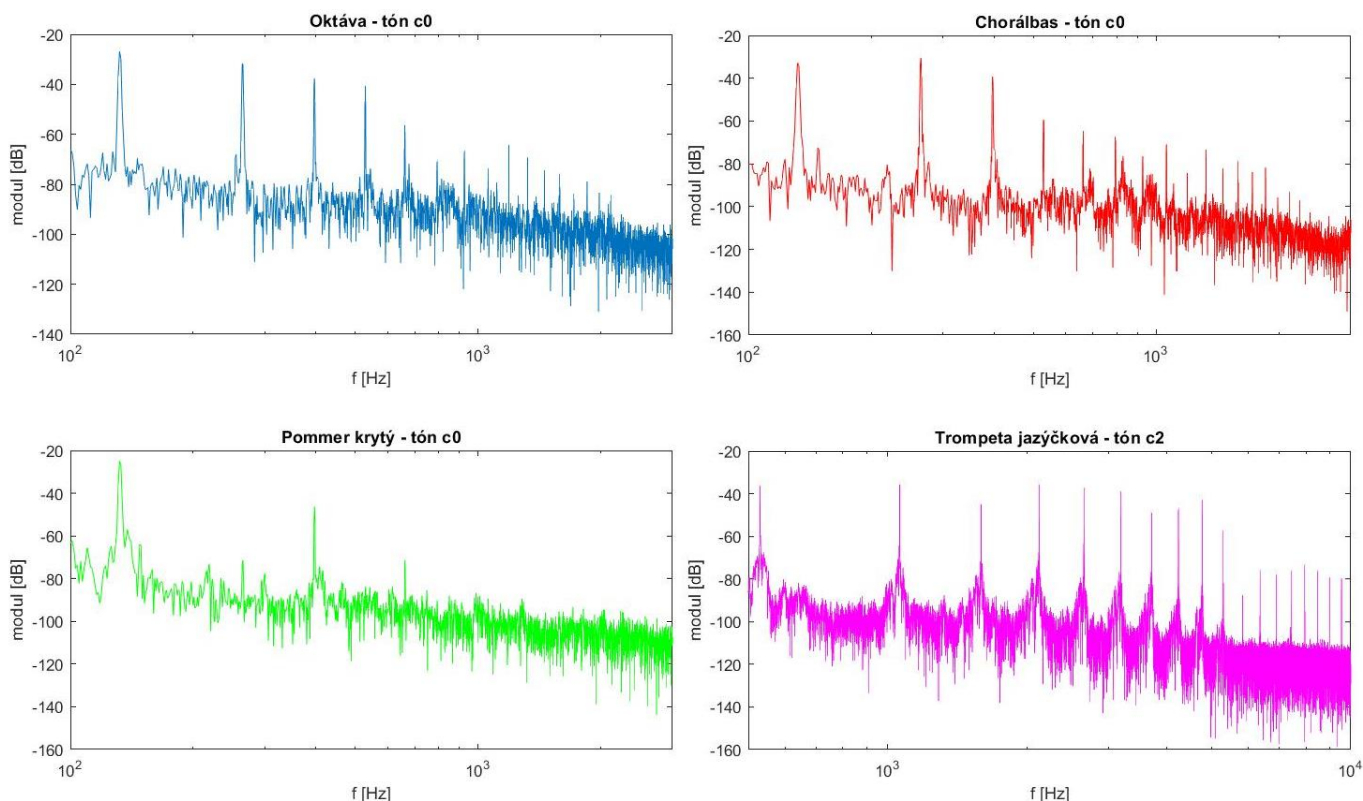
Tabulka 4.1 Rozměry analyzovaných píšťal

| Znějící tón          | c (130,81 Hz)    |                  |                  | c2 (524 Hz)                    |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|
| Píšťala              | Oktáva 4'        | Chorálbas 4'     | Pommer krytý 16' | Trompeta jazyková              |
| Materiál             | 70 % Sn, 30 % Pb | 50 % Sn, 50 % Pb | borovicové dřevo | měděný (bronzový) plech        |
| Činná délka [mm]     | 1053             | 1100             | 540              | 20 (jazýček)                   |
| Průměr [mm]          | 72               | 85               | 54,6 (45-52)     | 10 (pouzdro)                   |
| Výška výřezu [mm]    | 10               | 12               | 14               | -                              |
| Otvor nohy [mm]      | 10               | 11               | 14               | 7                              |
| Tloušťka plechu [mm] | 1                | 1                | 10               | 0,2 (jazýček), 0,3 (ozvučnice) |

#### 4.4.2 Naměřené hodnoty

Tabulka 4.2 Úroveň jednotlivých vyšších harmonických složek měřených píšťal

| Znějící tón                                                                           | c (130,81 Hz)    |                       |                  | c2 (524 Hz)                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|
| Píšťala                                                                               | Oktáva 4'        | Chorálbas 4'          | Pommer krytý 16' | Trompeta jazyková              |
| Materiál                                                                              | 70 % Sn, 30 % Pb | 50 % Sn, 50 % Pb      | borovicové dřevo | měděný (bronzový) plech        |
| Činná délka [mm]                                                                      | 1053             | 1100                  | 540              | 20 (jazýček)                   |
| Průměr [mm]                                                                           | 72               | 85                    | 54,6 (45-52)     | 10 (pouzdro)                   |
| Výška výřezu [mm]                                                                     | 10               | 12                    | 14               | -                              |
| Otvor nohy [mm]                                                                       | 10               | 11                    | 14               | -                              |
| Tloušťka plechu [mm]                                                                  | 1                | 1                     | 10               | 0,2 (jazýček), 0,3 (ozvučnice) |
| Úroveň vyšších harmonických složek [dB]                                               |                  |                       |                  |                                |
| Znějící tón                                                                           | c (130,81 Hz)    |                       |                  | c2 (524 Hz)                    |
| Píšťala                                                                               | Oktáva 4'        | Chorálbas 4'          | Pommer krytý 16' | Trompeta jazyková              |
|                                                                                       | $Lp_{f_n}$       | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$ | $Lp_{f_n}$       | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$          |
| $f_1$                                                                                 | -26,93           | 0                     | -32,81           | 0                              |
| $f_2$                                                                                 | -31,74           | -4,82                 | -30,54           | 2,28                           |
| $f_3$                                                                                 | -37,72           | -10,79                | -39,20           | -6,39                          |
| $f_4$                                                                                 | -40,88           | -13,95                | -59,46           | -26,65                         |
| $f_5$                                                                                 | -56,44           | -29,51                | -64,57           | -31,76                         |
| $f_6$                                                                                 | -70,81           | -43,39                | -67,46           | -34,65                         |
| $f_7$                                                                                 | -66,68           | -39,75                | -76,58           | -43,77                         |
| $f_8$                                                                                 | -73,82           | -46,90                | -70,93           | -38,12                         |
|                                                                                       | -91,87           | -66,82                | -46,77           | -10,38                         |
| Celková hladina akustického tlaku, Spektrální centroid a roll-off, jasnost a tonalita |                  |                       |                  |                                |
| $Lp$ [dB <sub>SPL</sub> ]                                                             | 75,53            | 72,41                 | 75,92            | 70,02                          |
| Spektrální centroid [Hz]                                                              | 1432             | 967                   | 1743             | 2662                           |
| Spektrální roll-off [Hz]                                                              | 9986             | 5425                  | 12002            | 10340                          |
| Jasnost [-]                                                                           | 27,14            | 23,44                 | 19,99            | 24,2                           |
| Tonalita [%]                                                                          | 67,84            | 78,26                 | 70,02            | 63,08                          |



Obr. 4.7 Grafické zobrazení spekter analyzovaných píšťal

V tabulce jsou uvedeny hodnoty jednotlivých harmonických složek prvního pásma, tedy 1. až 8. harmonické složky. První harmonická složka je ve zvuku vnímána jako nosná, druhá složka přímo podporuje fundament a tón zmohutňuje. Tyto složky nelze považovat za barvotvorné. Vliv na tímbr má až 3. harmonická, která tónu přidává dutost a tupost. Čtvrtá, šestá a osmá harmonická složka tón barevně zjasňují, pátá, sedmá, příp. 9. harmonická složka přidávají tónu ostrost a drsnost [11].

Oktáva 4' je ve zvuku typický principálový varhanní rejstřík, který je k nalezení snad v každých varhanách. Intenzita prvních 4 harmonických složek klesá docela rovnoměrně, mezi 4. a 5. harmonickou složkou dochází k významnému intenzitnímu zlomu. Intenzita harmonických složek znovu zesílí ve druhém pásmu, intenzita 9., 10. a 11. harmonické složky je vyšší než intenzita sudých harmonických složek ve druhé polovině prvního pásma (obr.4.7). To má zřejmě vliv na ostrost znějícího tónu. Ve znějícím tónu je znatelná šumová složka, která sice velkou měrou vznikla zachycením zvuku elektromotoru

kompresoru, avšak je obsažena i přímo ze zvuku vycházejícího z píšťaly. To bude patrně ovlivněno způsobem rozrážení vzduchového proudu o hranu horního rtu.

Chorálbas 4' na první pohled zaujal svou šířkou. Zvuk píšťaly je méně ostrý a šumový než u Oktávy 4'. Širší menzura dává zvuku mohutnost, zajímavostí je, že nejintenzivnější složkou není fundament, ale 2. harmonická složka. Ve spektru je zřejmý intenzitní zlom mezi 3. a 4. harmonickou složkou. Velký rozdíl u obou píšťal je však v intenzitě 7. a 9. harmonické složky (obr. 4.7), která je znatelně silnější u Oktávy 4', proto je její zvuk zřejmě ostřejší. Vyšší intenzita těchto dvou pro zvuk zásadních harmonických složek může být, na základě předchozích poznatků, způsoben jednak menzurou (širší u Chorálbasu 4'), jednak tvrdostí materiálu (vyšší poměr olova ve slitině snižuje tvrdost materiálu, přičemž tvrdší materiál podporuje vznik intenzivnějších vyšších harmonických). Velký rozdíl je též pozorovatelný i mezi energetickým centrem spektra, které se u Oktávy 4' nachází až ve druhém pásmu spektra, zatímco u Chorálbasu 4' je energetické těžiště stanoveno mezi sedmou a osmou harmonickou složkou. Společně s vyjádřením tonality (která je znatelně vyšší u Chorálbasu 4'), tak dává umístění spektrálního centroidu za pravdu předchozímu tvrzení, že zvuk Chorálbasu 4' je méně ostrý a šumový.

Zvukový tón krytý dřevěné píšťaly je oproti předchozím dvěma vzorkům velmi chudý. Není divu, neboť i při běžné varhanní hře tvoří flétnové rejstříky protipól k principálům, a to jak dynamický, tak zvukobarevný. Ve spektru tohoto rejstříku je možné jednoznačně nalézt fundament, 3. harmonickou složku a 5. harmonickou složku (obr. 4.7). Kolem kmitočtu 260 Hz lze nalézt i 2. harmonickou složku, která je oproti 1. harmonické složce slabší o více než 46 dB a oproti 3. harmonické složce o více než 25 dB. Její vliv na výsledný zvuk je tedy minimální až zanedbatelný. Zvuk této píšťaly by bylo velmi snadné vytvořit pomocí harmonické nebo složkové syntézy a přidaného šumového generátoru. Veškerá barva píšťaly je tedy generována jen omezeným množstvím především lichých harmonických složek v tónovém pásmu, dále pak především šumem. Tato poměrně jednoduchá barva je potvrzena i nejnižší hodnotou jasnosti ze všech zkoumaných píšťal. Napodobit zvuk takové píšťaly lze poměrně jednoduše, např. prostřednictvím aditivní syntézy a šumového generátoru

Trompeta jazyčková produkuje v tónovém pásmu (1. až 6. harmonická) srovnatelné hodnoty harmonických složek s výjimkou 3. harmonické, která tónu přidává dutost.

Ostrost je ve zvuku zastoupena výraznou 9. harmonickou složkou, neméně výrazný vliv na „průbojnost“ mají i harmonické složky v tzv. 2. pásmu. Zvuk samotné píšťaly působí až nepříjemně, nicméně v kombinaci s dalšími varhanními rejstříky jde o zajímavé zabarvení celkového tónu, k čemuž jsou jazykové píšťaly určeny především. Zdácnivě vysoká poloha spektrálního centroidu je zde dána tím, že se fundament nachází oproti třem předchozím píšťalám o celé dvě oktávy výše, poloha centroidu je tedy mezi 4. a 5. harmonickou složkou. Vysoká hodnota jasnosti je zřejmě dána intenzivními harmonickými složkami v 1. i 2. pásmu.

## 5. SIMULACE REZONÁTORŮ VARHANNÍ PÍŠŤALY V PROSTŘEDÍ ANSYS

### 5.1 Obecný postup získávání dat

Pro tvorbu návrhu částí těla varhanní píšťaly, přesněji řečeno rezonančních skříní retných píšťal a ozvučnic píšťal jazýčkových, byl použit modulární software ANSYS Student 2021 R2. Integrované moduly umožňují mimo jiné řešení různých fyzikálních problémů, které jsou efektivně řešeny metodou konečných prvků. Komplexní řešení sestává ze 3 hlavních kroků:

#### 1. Příprava výpočtu (sekce engineering data, geometry a mesh)

V uvedených sekcích proběhne volba konstrukčního materiálu z nabízeného katalogu, modifikace jeho vlastností, v případě neexistence požadovaného materiálu je možné nový materiál nadefinovat. Dále proběhne geometrická modeláž tělesa k analýze. Tu je možné provádět jak dvourozměrně, tak prostorově. Po dokončení tělesa proběhne vytvoření sítě po celém povrchu tělesa. Tato síť má konečný počet prvků.

#### 2. Matematické řešení (solution)

Podstatný je výběr modulu analýzy, která se bude u vytvořeného objektu provádět (pro potřeby této práce se jedná o analýzu modální a harmonickou). Před započítím řešení dochází k zadání výchozích podmínek, např. velikost a směr síly působící na těleso, tlumení či definice míst s pevným ukotvením. Dále je zde provedeno nastavení kmitočtového rozsahu či maximální počet vyhledávaných modů. Analýza je pak prováděna pro každé oko vytvořené sítě.

#### 3. Výsledek, zpracování získaných dat (postprocessing)

Je-li proces analyzování zdárně dokončen, přichází na řadu zobrazení výsledků, buďto v podobě numerické nebo v podobě grafické. Tato data je možné dále zpracovávat a vkládat do tabulkových či textových editorů.

### 5.2 Simulace rezonátorů a ozvučnic

Vzhledem k tomu, že je u standardní retné varhanní píšťaly, která není nahoře zakrytá vybudeno stojaté vlnění podle elementárního fyzikálního popisu, jsou následující simulace retných píšťal pojety jako analýza trubic na obou koncích otevřených, mající

rozměry činné délky fyzické píšťaly (tj. délky píšťaly od hrany výřezu po horní hranu píšťaly, příp. po ladítko). Pro mechanické vlastnosti materiálů, ze kterých jsou modelované píšťaly k simulaci vytvořené, jsou využity tabulkové hodnoty pro dané materiály, které buďto poskytl přímo software ANSYS v rámci materiálového katalogu v sekci Engineering Data nebo byly modifikovány dle tabulkových hodnot, poskytnutých ze zdrojů, na které je odkazováno v závěru 3. kapitoly. Byly tedy vytvořeny a následně analyzovány rezonátory celkem 3 retných a 2 jazýčkových píšťal, přičemž se jedná píšťaly s fyzickým základem, které byly konstrukčně spojovány a upravovány v rámci jedné z částí zadání této práce. Vzhledem k předpokladu, že všechny materiály využitě pro experimentální práci jsou izotropní, nebylo zapotřebí definovat rozdílné parametry pro konkrétní směr.

### 5.2.1 Simulace píšťaly Principál

Píšťala Principál je konvenční varhanní píšťala cylindrického průřezu, kterou se podařilo pro tuto práci získat od varhanního konstruktéra a mechanika Josefa Hrocha. Píšťala je vyrobena z varhanního kovu (slitina cínu a olova v poměru 1:1) a její rozměry potřebné pro modelování jsou uvedeny v tabulce 5.1.

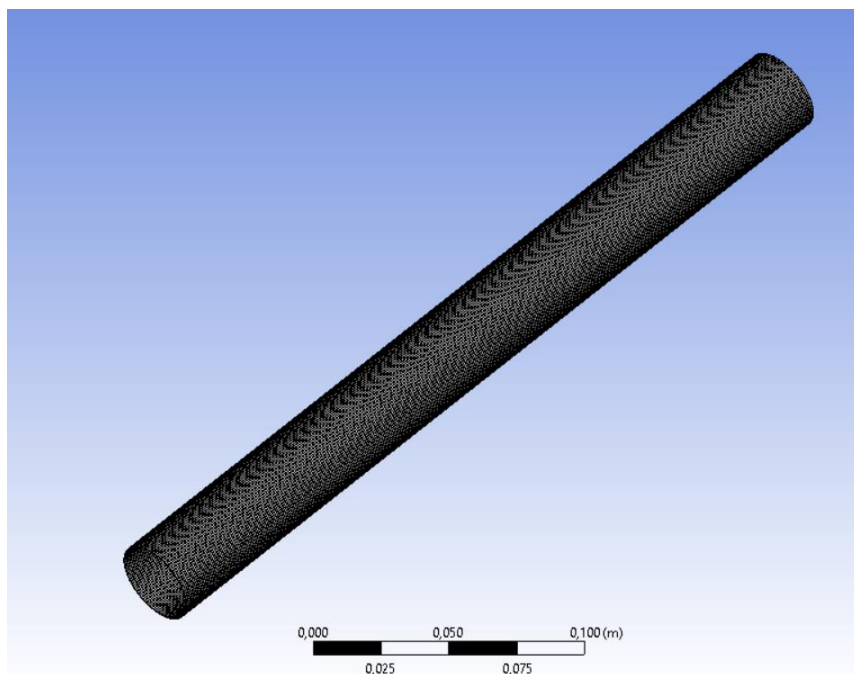
Tabulka 5.1 Rozměry píšťaly Principál

| Píšťala                 | Principál        |
|-------------------------|------------------|
| Materiál                | 50 % Sn, 50 % Pb |
| Činná délka [mm]        | 330              |
| Průměr [mm]             | 26               |
| Tloušťka materiálu [mm] | 1                |

Uvedený materiál se v databázi softwaru ANSYS nepovedlo najít, byl však nalezen materiál podobný, označený jako pájka (solder) s poměrem potřebných kovů 60% Sn, 40% Pb. Jelikož jsou tabulkové hodnoty modulu pružnosti v tahu a hustoty pro požadovaný materiál k dispozici v tabulce 3.1, nebylo obtížné tyto parametry převést do programu ANSYS, čímž byl získán adekvátní virtuální materiál pro simulaci.

V softwaru SpaceClaim tak proběhlo vytvoření válcové trubice o délce 330 mm s průměrem 26 mm a tloušťkou 1 mm. Toho bylo docíleno pomocí Sketch mode pomocí náčrtu 2 kružnic s poloměrem lišícím se o 1 mm a jejich vytažením do prostoru, čímž vzniklo trojrozměrné těleso. Výsledná trubice byla poté importována do modulu

Mechanical, kde proběhla příprava k výpočtu modální analýzy. Nejprve byl přiřazen materiál trubice, dále už následovalo vytvoření sítě konečných prvků (obr. 5.1).



Obr. 5.1 Model trubice píšťaly Principál

V sekci Modal proběhlo nastavení pro výpočet 80 rezonančních modů v rozsahu od 0 do 5000 Hz. Dále byl jeden konec pevně zafixován, jak tomu bývá při standardním usazení píšťaly v nástroji. Výsledkem jsou pak frekvence standardně 80 rezonančních modů v trubici.

V sekci Harmonic Response probíhalo nastavení pro analýzu frekvenční odezvy v trubici. Rozsah měření byl stanoven na 0 Hz až 3100 Hz, z důvodu požadavku programu, aby rozsah harmonické analýzy byl o třetinu užší než v případě modální analýzy. Dle Ing. Plánského se síla působící na vnitřní stranu retných píšťal pohybuje řádově ve stovkách jednotek N, proto byla zvolena působící síla cca 300 N. Výsledkem jsou především grafy frekvenční odezvy a hladiny ekvivalentního vyzářeného výkonu (teoreticky všesměrově vyzářený výkon spočítaný pro elementární plochy, vyjádřený v dB [20]). Vyobrazené peaky na těchto grafech poslouží k lokalizaci rezonančních oblastí při LPC analýze reálných zvukových vzorků.

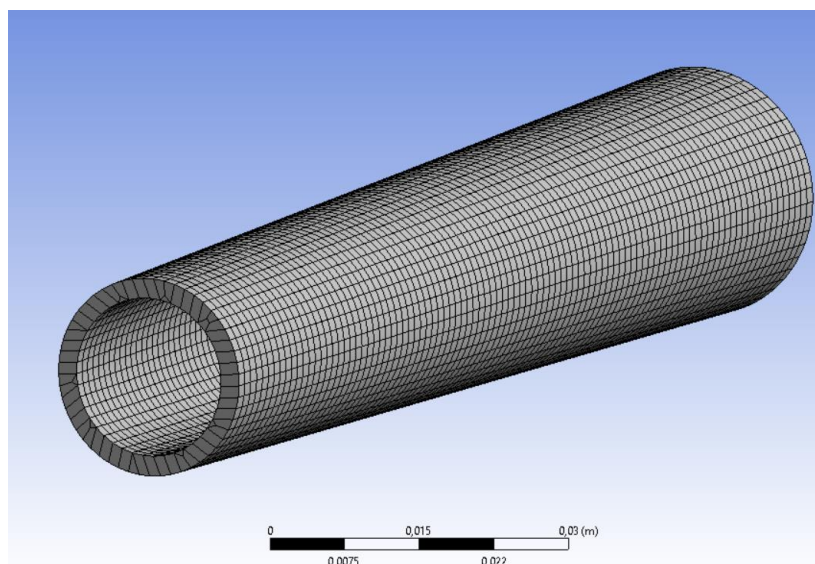
### 5.2.2 Simulace píšťaly Flétna zobcová

Flétna zobcová je standardním a ve světě hojně rozšířeným hudebním nástrojem s typickým zvukovým zabarvením. Přestože se tyto flétny dříve hojně vyráběly ze dřeva, poměrně dlouhou dobu se lze ponejvíce setkat s flétnami vyrobenými z Akrylonitrilbutadienstyrenu, zjednodušeně ABS plastu. Rozměry modelované píšťaly uvádí následující tabulka (5.2)

Tabulka 5.2 Rozměry píšťaly Flétna zobcová

| Píšťala                 | Zobc. flétna |
|-------------------------|--------------|
| Materiál                | ABS plast    |
| Činná délka [mm]        | 130          |
| Průměr [mm]             | 20 - 16      |
| Tloušťka materiálu [mm] | 4            |

Data s vlastnostmi materiálů bylo možno využít ze dvou pramenů, jednak z integrované databáze programu ANSYS a jednak z již vzpomínané tabulky v kapitole 3 (3.1). Jak je z tabulky zřejmé, tělo flétny se zužuje, je tedy mírně kuželovité a modelování kónické trubice bylo výrazně náročnější. Postupem ekvivalentním z podkapitoly 5.2.1 se opět podařilo získat kmitočty rezonančních módů, frekvenční odezvu a graf hladiny ekvivalentního vyzářeného výkonu.



Obr. 5.2 Model trubice píšťaly Flétna zobcová

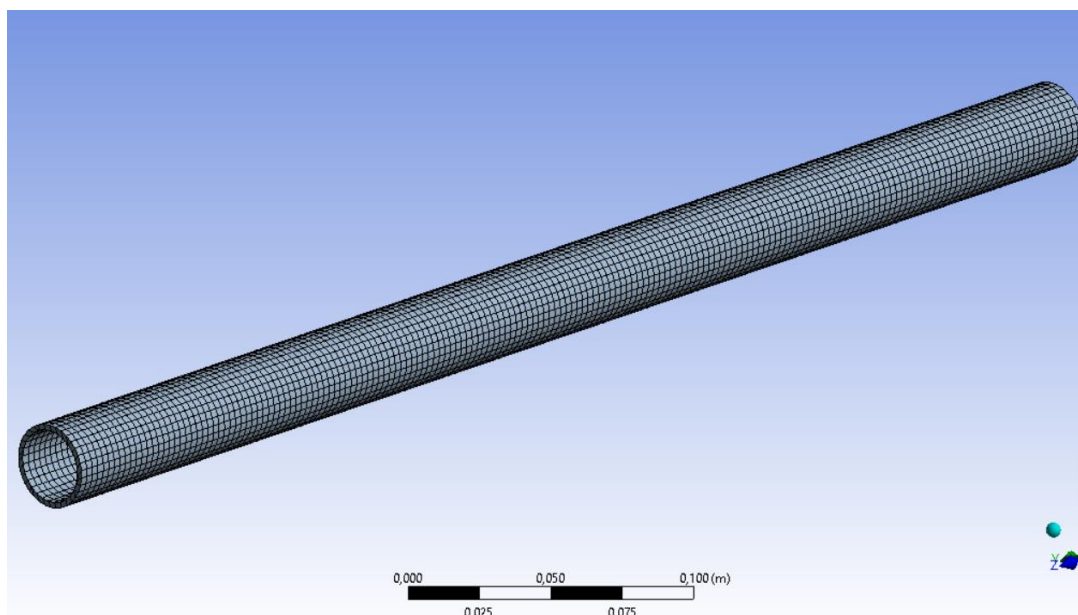
### 5.2.3 Simulace píšťaly Flétna hadicová

Jak je patrné z názvu, modelovaným rezonátorem této píšťaly je zahradní hadice vyrobená z měkkého PVC. Rozměry pro model jsou uvedeny v tabulce (5.3):

Tabulka 5.3 Rozměry píšťaly Flétna hadicová

| Píšťala                 | Flétna hadicová |
|-------------------------|-----------------|
| Materiál                | měkčené PVC,    |
| Činná délka [mm]        | 510             |
| Průměr [mm]             | 24              |
| Tloušťka materiálu [mm] | 4               |

Podle uvedených informací je zřejmé, že se bude jednat o poměrně úzce menzurovanou a velmi pružnou píšťalu. Dle tabulky vlastností materiálů (3.1) je modul pružnosti měkkého PVC o dva řády nižší než v případě ostatních látek. Vzhledem k tomu, že interní databáze neposkytovala hodnoty pro měkké PVC, bylo nezbytné tento materiál vytvořit dle tabulkových hodnot.



Obr. 5.3 Model trubice píšťaly Flétna hadicová

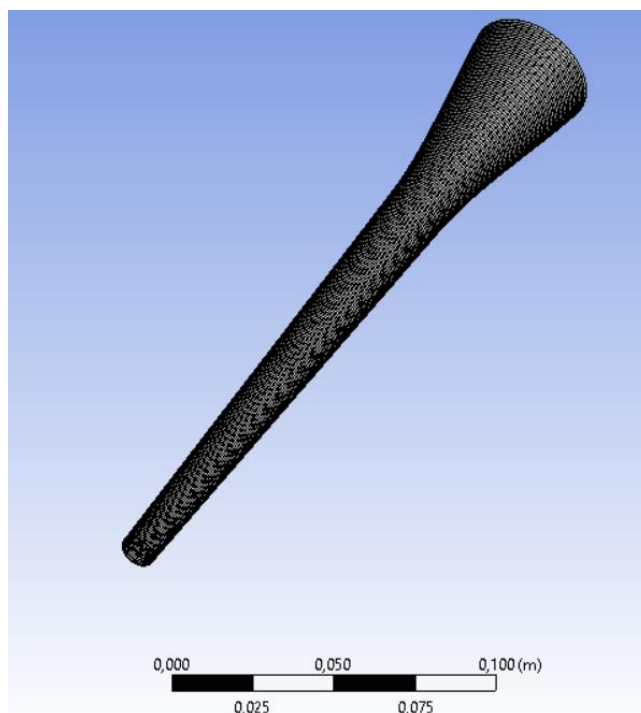
### 5.2.4 Simulace ozvučnice Hoboj (původní)

U jazykových píšťal bylo přistoupeno k jinému způsobu modelování. Zatímco u retné píšťaly je primárním rezonátorem především činná (aktivní) délka píšťaly, u jazyčkové

je primárním rezonátorem celá ozvučnice. Pro adekvátní výpočet je tedy nezbytné vymodelovat ozvučnici jako celek. Je-li frekvence jazýčku poblíž některé z rezonančních frekvencí rezonátoru, ozve se plný tón píšťaly připomínající zvuk žesťových či dvouplátkových nástrojů. Ozvučnice původní jazykové píšťaly je opět vyrobena z varhanního kovu, kde je poměr cínu a olova ve slitině 1:1. Tvarem se jedná o smíšený typ ozvučnice (obr. 5.4).

Tabulka 5.4 Rozměry ozvučnice Hoboj jazykový

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Píšťala                        | Hoboj jazykový   |
| Materiál                       | 50 % Sn, 50 % Pb |
| Průměr roztrubu (vnitřní) [mm] | 37               |
| Průměr střední [mm]            | 21               |
| Průměr spodní [mm]             | 9                |
| Délka nálevky 1 [mm]           | 180              |
| Délka nálevky 2 [mm]           | 78               |
| Tloušťka materiálu [mm]        | 1                |



Obr. 5.4 Model ozvučnice píšťaly Hoboj jazykový

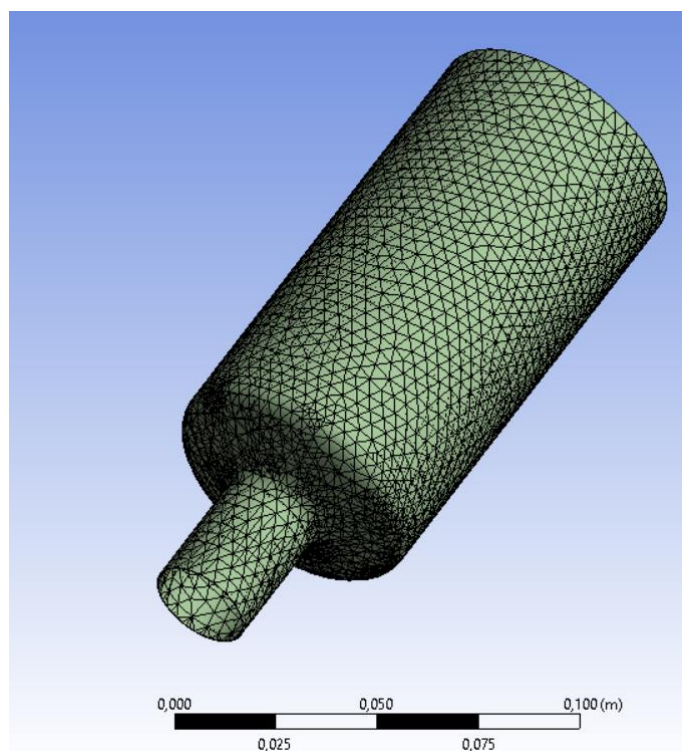
### 5.2.5 Simulace ozvučnice Hoboj (PET)

Aby bylo možné určit nakolik má na témbu tónu vliv rozdílný tvar, tloušťka a materiál,

byla vymodelována ozvučnice s přiřazenými materiálovými vlastnostmi pro Polyethylene terephthalate čili PET. Tento materiál byl v databázi materiálů pro analýzu dostupný, tudíž nebylo nutné jeho úplné vytvoření.

Tabulka 5.5 Rozměry ozvučnice Hoboj PET

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Píšťala                        | Hoboj jazykový |
| Materiál                       | PET            |
| Průměr roztrubu (vnitřní) [mm] | 64             |
| Průměr spodní [mm]             | 9              |
| Délka hrdla [mm]               | 34             |
| Délka hlavního válce [mm]      | 115            |
| Tloušťka materiálu [mm]        | 0,5            |



Obr. 5.5 Model ozvučnice píšťaly Hoboj jazykový - PET

## 6. VÝROBA A ÚPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH PÍŠŤAL

Jak bylo již dříve uvedeno, virtuálně modelované trubice a ozvučnice píšťal vychází z fyzického základu v podobě nově vyrobených či modifikovaných konvenčních píšťal.

V rámci této práce byly zvoleny tři postupy jak zvuk vygenerovat, či změnit a odlišit od původního, vydávaného standardní píšťalou.

Pro každou vyrobenou či upravenou píšťalu bude v kapitole 8 provedena analýza spektra, následné porovnání spekter a zhodnocení přínosu provedených úprav.

### 6.1 Píšťala kombinovaná

Prvním z přístupů k tvorbě nového zvuku je kombinace tónů více píšťal znějících ve stejném čase. Pro tento experiment byly zvoleny konvenční píšťaly Principál a Flétna zobcová. Cílem je prokázání významu obou současně píšťal na intenzitu jednotlivých složek ve spektru (obr.6.1):



Obr. 6.1 Píšťala kombinovaná

Přívodní vzduchové hadice, napájející píšťaly jsou vespod svedeny do jednoho ventilu, aby bylo možné píšťalu napájet z jediného zdroje vzduchu. Regulace přívodu vzduchu je pak prováděna ovládacími ventily pro každou hadici, aby bylo možné do

každé píšťaly dostat patřičný tlak vzduchu (Flétna zobcová potřebuje k vybuzení tónu výrazně nižší tlak, než kovový principál).

Frekvence píšťal jsou navzájem téměř v celočíselném poměru, kdy je Principál naladěm na frekvenci 449 Hz (tón  $a_1+$ ) a Flétna zobcová na 891 Hz (tón  $a_2+$ ).

## 6.2 Flétna hadicová

Další možností, jak získat funkční zvukový zdroj je výroba zcela nové píšťaly. Tělo experimentálně vyrobené píšťaly (obr. 6.2) je z měkčeného PVC, jádro a výřez pak z ABS plastu (torzo zobcové flétny). Po utěsnění skulin a zajištění, aby výřez přilnul na vnitřní stěnu těla se podařilo vybudit znělý tón.



Obr. 6.2 Flétna hadicová

Výhodou takové v principu jednoduché píšťaly je ovlivňování zvukové barvy v čase (přefukování, flažolet, změna výšky tónu za pomoci prostého ohýbání). Nevýhodou je tónová jalovost a poměrně malá intenzita konečného tónu ve srovnání s tužšími materiály. Základní tón, který se podařilo vybudit má frekvenci 277 Hz, což odpovídá tónu  $cis_1$ .

### 6.3 Hoboj jazykový – PET ozvučnice

Ve snaze posoudit vliv ozvučnice na barvu tónu jazýčkové píšťaly byla vyrobena PET ozvučnice, která se svou délkou příliš neliší od původní, avšak má odlišný tvar. Proto se nabízí přímá konfrontace se zvukem původní ozvučnice pomocí srovnání spekter. Dále byla PET ozvučnice upravena vložením trubice z lesklého fotografického papíru do široké cylindrické části PET ozvučnice, která zde plní funkci filtru. I tady se nabízí vzájemné srovnání intenzity harmonických složek ve spektru.



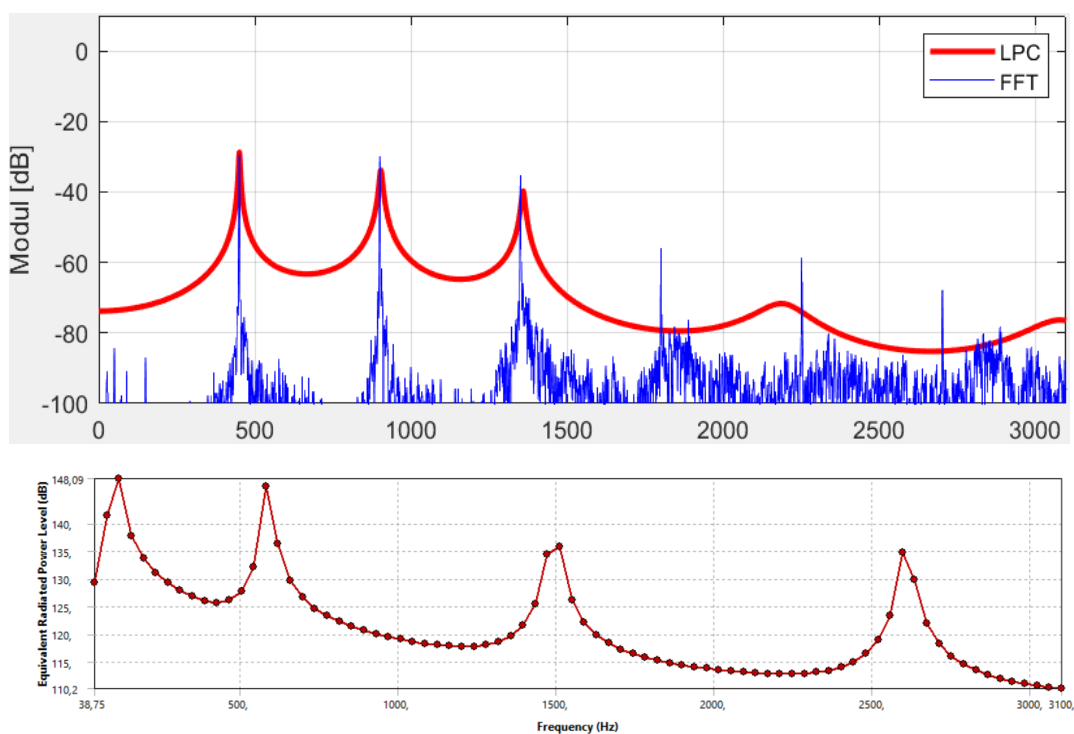
Obr. 6.3 Hoboj jazykový s PET ozvučnicí

## 7. POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH HODNOT REZONANCÍ

V následující kapitole proběhne srovnání hodnot získaných modální a harmonickou analýzou modelových rezonátorů, které byly pro tento účel vytvořeny v programu ANSYS s hodnotami získanými analýzou zvukových vzorků reálně vytvořených píšťal. Velmi názorným ukazatelem, který přímo zobrazuje kmitočtovou polohu rezonancí je graf hladiny ekvivalentního vyzářeného výkonu který ve srovnání s grafem LPC, aplikovaného na reálné vzorky poukáže na vliv rezonance těla píšťaly ve spektru zvuku.

### 7.1 Srovnání pozic formantů píšťaly Principál

V následujícím zobrazení (7.1) lze vidět polohu reálných a teoretických formantových oblastí u píšťaly Principál. Základním tónem této píšťaly je  $a_1+$  (449 Hz)



Obr. 7.1 LPC graf a ERP graf – píšťala Principál

Simulace prokázala, že 1., 3. a 4. formantová oblast vzniká rezonancí aktivní části píšťaly. Pozice těchto rezonancí se liší řádově o několik desítek Hz, což je z praktického hlediska přijatelná hodnota, zvláště pokud bereme v potaz, že běžná úprava výšky intonace se provádí v rozmezí celého tónu. Predikovaná 1. rezonanční oblast (okolo 120

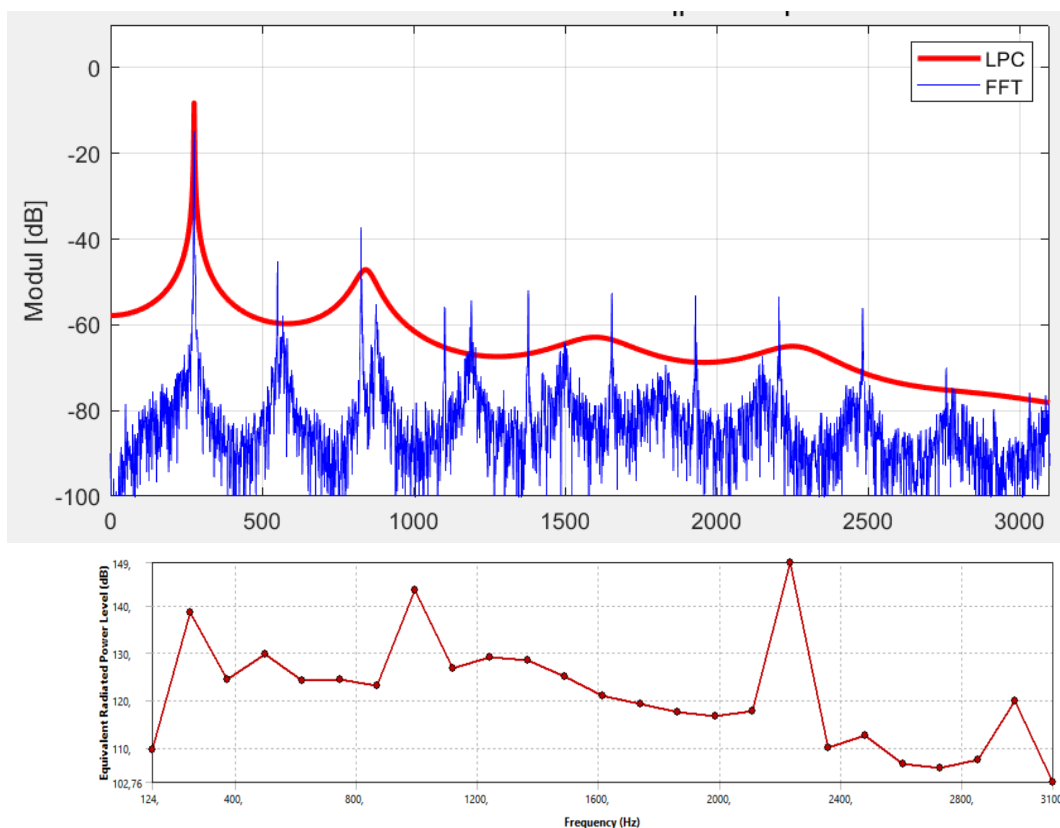
Hz) se v reálném spektru neprojevuje, neboť frekvence fundamentu (1. harmonické složky) je rovna 491 Hz. Existence 2. formantové oblasti, kterou lze spatřit v reálném spektru není v simulaci nikterak naznačena. Orientační poloha formantových oblastí je shrnuta v tabulce (7.1).

Tabulka 7.1 Orientační poloha formantových oblastí – Principál

| Principál – formanty |                 |
|----------------------|-----------------|
| reálné [Hz]          | vypočítané [Hz] |
| 451                  | 581             |
| 905                  | -               |
| 1370                 | 1511            |
| 2300                 | 2596            |

## 7.2 Srovnání pozic formantů píšťaly Flétna hadicová

Protože je tělo hadicové flétny vyrobeno z velmi pružného materiálu, lze předpokládat velký počet rezonančních modů těla píšťaly.



Obr. 7.2 LPC graf a ERP graf – píšťala Flétna hadicová

Tabulka 7.2 Orientační poloha formantových oblastí – Flétna hadicová

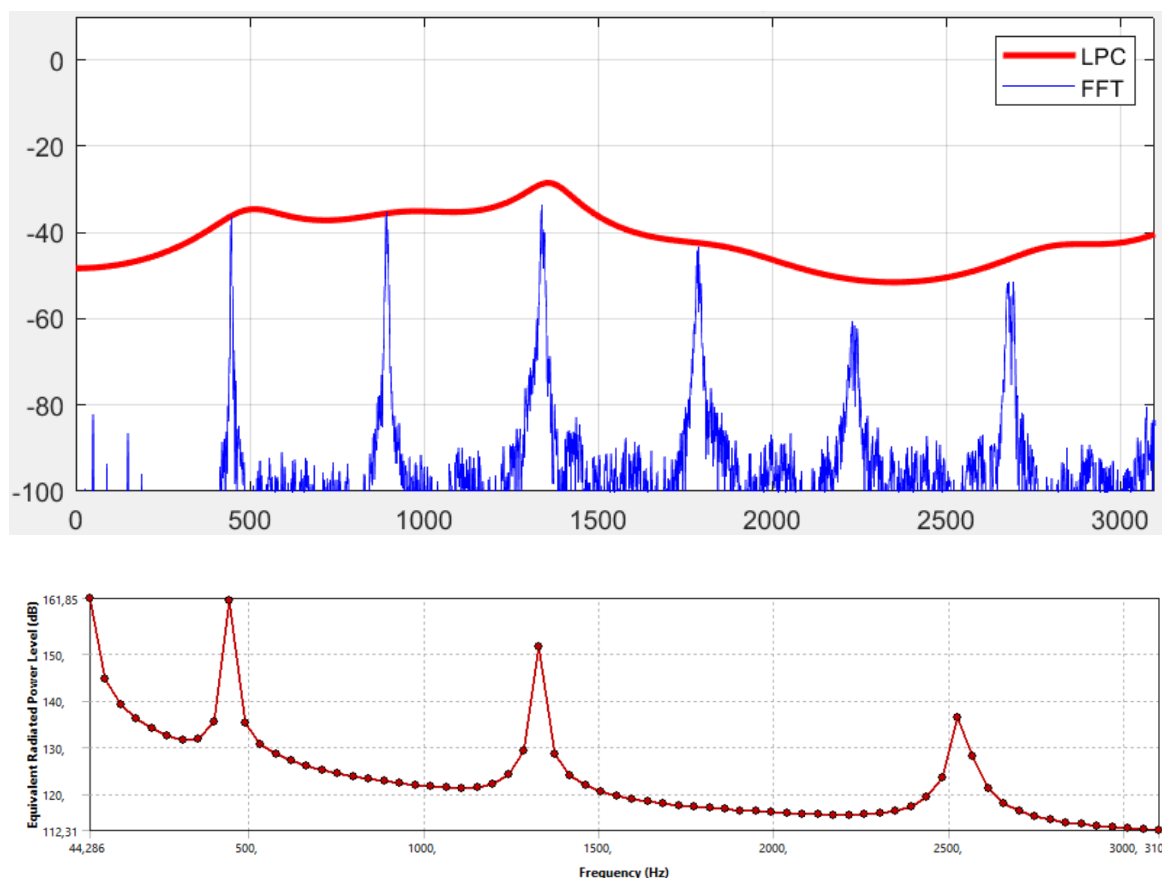
| Flétna hadicová – formanty |                 |
|----------------------------|-----------------|
| reálné [Hz]                | vypočítané [Hz] |
| 280                        | 248             |
| -                          | 496             |
| 860                        | 950             |
| 1650                       | -               |
| 2320                       | 2232            |
| -                          | 2970            |

Ve spektru hadicové flétny jsou na první pohled patrné výrazné inharmonicity, které souvisí s počtem nalezených rezonančních modů (od 0 Hz do 4500 Hz nalezeno 800 rezonančních modů). Je tedy pravděpodobné, že výsledný tón bude obsahovat velké množství šumových složek a malé množství efektivních složek, formující zvukovou barvu.

Předpokládané oblasti formantů určené matematickou analýzou modelu lze v reálném spektru od 0 do 3 kHz pozorovat ve čtyřech místech. Harmonická analýza predikovala rezonanci ještě okolo kmitočtu 496 Hz (poblíž druhé harmonické složky, nicméně v reálném spektru tato oblast nebyla nalezena. Naopak v reálném spektru lze pozorovat formantovou oblast okolo kmitočtu 1600 Hz, která se ovšem nenachází v grafickém vyjádření matematického modelu.

### 7.3 Srovnání pozic formantů ozvučnice Hoboj jazykový

U jazyčkové píšťaly je princip rozezvučení podobný nátrubkovým (žesťovým) nástrojům. Plný tón se tedy z píšťaly ozve, je-li frekvence kmitání jazyčku blízká rezonančnímu kmitočtu ozvučnice. Tělo tohoto rezonátoru je ze stejného materiálu, jako Principál (kap. 7.1). Základní tón píšťaly je  $a_1+$  (447 Hz)



Obr. 7.3 LPC graf a ERP graf – ozvučnice Hoboj

Rezonanční kmitočty navrhované ozvučnice se s výjimkou prvního (který je nižší než jazýčkový tón, tudíž se ve spektru neprojeví) promítly i v reálném spektru. Polohy detekovaných formantových oblastí jsou numericky vyjádřeny v tabulce (7.2).

Tabulka 7.3 Orientační poloha formantových oblastí – Hoboj

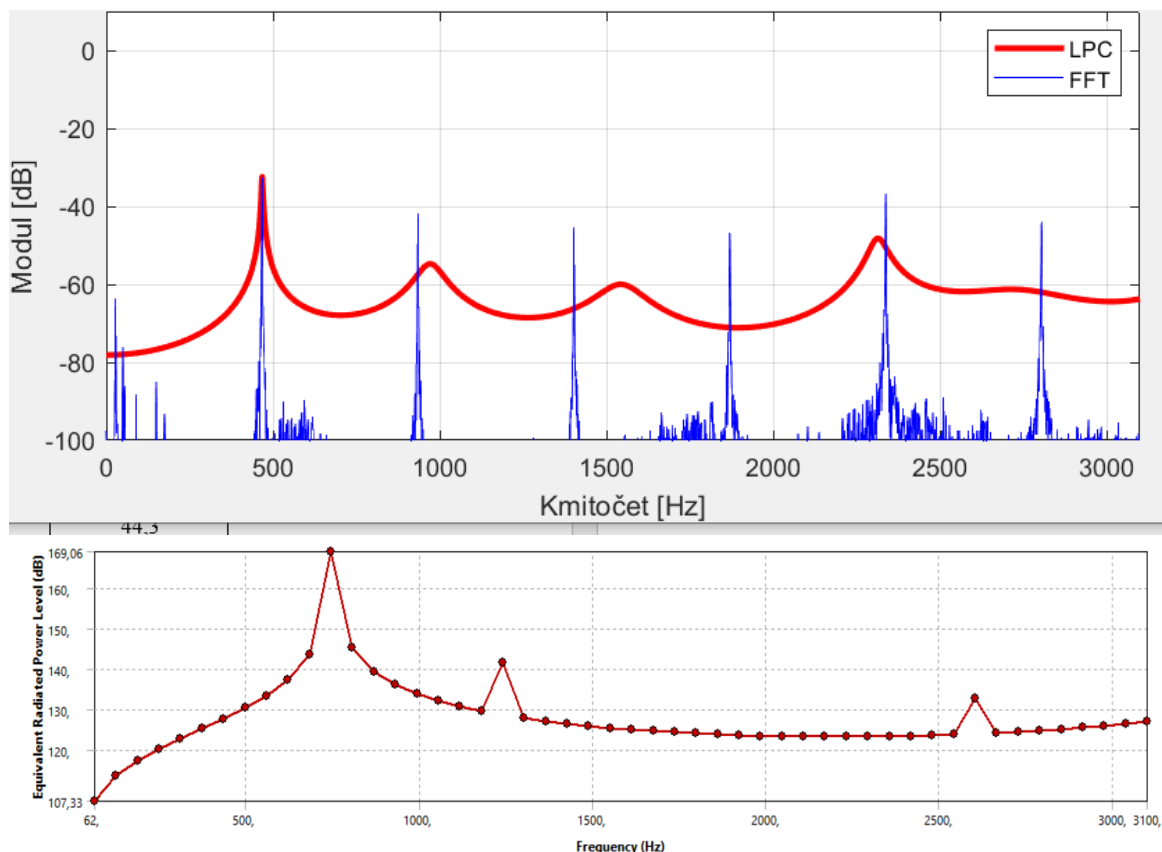
| ozvučnice Hoboj – formanty |                 |
|----------------------------|-----------------|
| reálné [Hz]                | vypočítané [Hz] |
| -                          | 44,3            |
| 470                        | 443             |
| 1330                       | 1328            |
| 2620                       | 2524            |

Při zvýšení predikčního řádu LPC analýzy lze pozorovat v reálném spektru i existenci formantové oblasti okolo 2. harmonické složky (900 Hz) a 4. harmonické složky

(1800 Hz), jejich intenzita je však nižší než v případě výše uvedených 3 formantových oblastí.

## 7.4 Srovnání pozic formantů ozvučnice Hoboj jazykový PET

Vzhledem k tomu, že činná délka jazýčku zůstala pro účely měření spektra ozvučen zachována, bude možné provést srovnání výšky základního tónu při výměně ozvučnice.



Obr. 7.4 LPC graf a ERP graf – ozvučnice Hoboj PET

Zobrazené rezonanční kmitočty u modelované plastové ozvučnice se nachází v okolí kmitočtů 720 Hz, 1230 Hz a 2600 Hz. V reálném spektru pozorujeme formantové oblasti v okolí kmitočtu fundamentu (470 Hz), druhé harmonické složky (955 Hz) a kmitočtu 1550 Hz a 2350 Hz. Vzájemné poměry rezonančních frekvencí matematického modelu PET ozvučnice tak odpovídají reálné vzdálenosti 1., 3. a 4. formantové oblasti, nicméně fundament je oproti realitě posunut o cca 250 Hz výše (viz tabulka 7.4).

Tabulka 7.4 Orientační poloha formantových oblastí – Hoboj PET

| ozvučnice Hoboj PET – formanty |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| reálné [Hz]                    | vypočítané [Hz] <sup>9</sup> |
| 470                            | 730                          |
| 955                            | 1230                         |
| 1550                           | -                            |
| 2350                           | 2600                         |

Výsledek harmonické analýzy z programu ANSYS poskytl možnost lokalizace a ověření přítomnosti rezonančních oblastí v píšťálách a ozvučnicích na základě výpočtu hodnot metodou konečných prvků. Za úspěšnou lze považovat analýzu ozvučnic jazykových píšťal, kde došlo při srovnání vypočtené a reálné hodnoty maximálně v řádech desítek Hertzů. V případě, že u ozvučnice Hoboj PET učiníme korekci fundamentu, platí úspěšnost simulace pro obě analýzy ozvučnic. Při analýze dvou retných píšťal jsou výsledky mírně nepřesné, např. v matematickém modelu píšťaly Principál je vykreslena významná rezonance na kmitočtu 2600 Hz, avšak v reálném spektru buďto chybí, nebo je výrazně posunuta. Další rezonance v reálném spektru mohou vznikat díky rezoncancí dalších částí píšťaly, které nebyly do modelu zahrnuty (noha píšťaly, úchyty atp.)

---

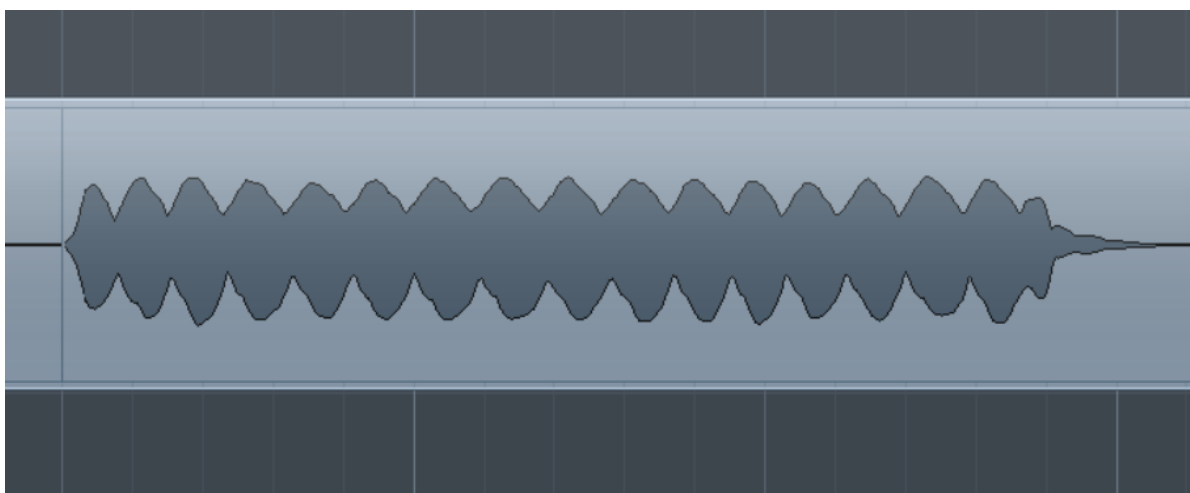
<sup>9</sup> U vypočítaných hodnot došlo zřejmě k chybě výpočtu, odpovídající hodnoty frekvencí mají být nižší o cca 250 Hz

## 8. ANALÝZA SPEKTRA KONSTRUOVANÝCH PÍŠŤAL

### 8.1 Analýza Píšťaly kombinované

Kombinovaná píšťala, sestávající z píšťal Principál a Flétna zobcová využívá jednoduchého principu, který je pro obohacování zvuku varhan používán již po staletí, a sice aditivní syntézy. Při běžné hře bývají pro jeden tón hráčem nastavovány nejrůznější zvukové kombinace všech možných typů píšťal za předpokladu, že výšky tónu každé z nich jsou navzájem ve vhodném poměru (typicky stejně vysoko, v oktávě, méně často v kvartě či kvintě). V případě řady kombinovaných píšťal (potažmo dvojpíšťal) je možné nastavit poměr vzájemné výšky a intenzity každé píšťaly různě dle vlastního uvážení.

V rámci demonstrace takového přístupu byly při nahrávání vzorku píšťaly mírně rozladěny, aby došlo ke vzniku rázů (záznějů). Jejich frekvence je dána absolutní hodnotou rozdílu základní frekvence první a druhé píšťaly (obr. 8.1).



Obr. 8.1 Časový průběh tónu kombinované píšťaly

Dále je kombinovaná píšťala podrobena analýze spektra, kde bude spektrum popsáno pro každou píšťalu zvlášť i pro společně znějící dvojpíšťalu. Bude tak dobře pozorovatelný vliv každé píšťaly na konečné spektrum (tab. 8.1).

Tabulka 8.1 Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – kombinovaná

| Píšťala                                                                               | Kombinovaná      |                     |              |                     |             |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------|
| Píšťaly                                                                               | Principál        |                     | Zobc. flétna |                     |             |                     |
| Materiál                                                                              | 50 % Sn, 50 % Pb |                     | ABS plast    |                     |             |                     |
| Znějící tón                                                                           | a1+ (449 Hz)     |                     | a2+ (891 Hz) |                     |             |                     |
| Úroveň vyšších harmonických složek [dB]                                               |                  |                     |              |                     |             |                     |
| Píšťala                                                                               | Principál        |                     | Zobc. Flétna |                     | Kombinovaná |                     |
|                                                                                       | $Lp_{fn}$        | $Lp_{fn} - Lp_{ft}$ | $Lp_{fn}$    | $Lp_{fn} - Lp_{ft}$ | $Lp_{fn}$   | $Lp_{fn} - Lp_{ft}$ |
| $f_1$                                                                                 | -29,23           | 0,00                | -36,45       | 0,00                | -27,94      | 0,00                |
| $f_2$                                                                                 | -29,95           | -0,72               | -73,82       | -37,37              | -20,80      | 7,13                |
| $f_3$                                                                                 | -35,49           | -6,26               | -63,36       | -26,92              | -38,59      | -10,65              |
| $f_4$                                                                                 | -55,96           | -26,73              | -73,44       | -37,00              | -46,13      | -18,20              |
| $f_5$                                                                                 | -58,87           | -29,64              | -60,16       | -23,71              | -59,46      | -31,53              |
| $f_6$                                                                                 | -67,95           | -38,72              | -91,76       | -55,31              | -44,35      | -16,42              |
| $f_7$                                                                                 | -62,71           | -33,48              | -75,02       | -38,58              | -75,39      | -47,45              |
| $f_8$                                                                                 | -67,55           | -38,32              | -89,44       | -52,99              | -59,16      | -31,22              |
| Celková hladina akustického tlaku, Spektrální centroid a roll-off, jasnost a tonalita |                  |                     |              |                     |             |                     |
| $Lp$ [dB <sub>SPL</sub> ]                                                             | 70,46            |                     | 60,90        |                     | 78,16       |                     |
| Spektrální centroid [Hz]                                                              | 2838             |                     | 3150         |                     | 2328        |                     |
| Spektrální roll-off [Hz]                                                              | 10206            |                     | 10092        |                     | 8464        |                     |
| Jasnost [-]                                                                           | 19,60            |                     | 21,53        |                     | 26,55       |                     |
| Tonalita [%]                                                                          | 66,17            |                     | 62,65        |                     | 72,45       |                     |

Ve spektru píšťaly Principál pozorujeme výraznou intenzitu u prvních tří harmonických složek která je způsobena přítomností formantových oblastí poblíž kmitočtů těchto složek, mezi třetí a čtvrtou harmonickou složkou pak dochází k intenzitnímu propadu přičemž intenzita následujících vyšších harmonických složek v prvním pásmu činí pokles oproti fundamentu o více než 30 dB.

Zobcová flétna má díky mírně kónickému tělu utlumené liché harmonické složky, okolo frekvence 7 harmonické složky (cca 6200 Hz) lze předpokládat významnou formantovou oblast. Protože je fundament zobcové flétny zhruba v oktávovém poměru k fundamentu Principálu, je zřejmé, že zvuk flétny ve výsledku podporuje 2., 4., 6. a 8. harmonickou složku což výslednému zvuku přidává na objemu, jasnosti a tonalitě, zároveň je ve sluchovém vjemu částečně maskován šum, neboť většina zvukové energie se ve výsledném zvuku nachází v tónovém a klastrovém pásmu.

## 8.2 Analýza spektra Flétny hadicové

Flétna hadicová byla vytvořena pro pochopení podstaty konstruování píšťal schopných vyloudit znělý zvuk. Jako návod pro konstruování posloužila především podkapitola 2.1, kde je zevrubně popsáno vše podstatné. Vzhledem k tomu že pokusy o výrobu funkčního výřezu nebyly úspěšné, bylo přistoupeno k získání vyzkoušeného funkčního výřezu ze zobcové flétny. Toto torzo bylo nutné opravit do té míry, aby ideálně nezůstal žádný pozůstatek po průměru těla předchozí flétny. Zasazení štěrbin do připraveného těla pevné PVC trubky nesplňovalo poměr pro vybudění tónu, bylo tedy nutné najít takové tělo, do kterého se podaří umístit a zafixovat torzo flétny tak, aby nevznikaly žádné netěsnosti. Takový materiál by měl být dostatečně elastický a pružný, proto padla volba na zahradní hadici, která měla průměr perfektně odpovídající velikosti torza flétny. Po řádné fixaci se podařilo vybudit znělý tón (konkrétně  $cis_1$ ), který může být použit pro spektrální analýzu

Tabulka 8.2 Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – flétna hadicová

|                                                    |                        |                       |
|----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Píšťala                                            | Flétna hadicová        |                       |
| Materiál                                           | měkčené PVC, ABS plast |                       |
| Znějící tón                                        | cis1 (277 Hz)          |                       |
| Úroveň vyšších harmonických složek [dB]            |                        |                       |
| Píšťala                                            | Flétna hadicová        |                       |
|                                                    | $Lp_{f_n}$             | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$ |
| $f_1$                                              | -14,78                 | 0                     |
| $f_2$                                              | -45,18                 | -30,40                |
| $f_3$                                              | -37,30                 | -22,53                |
| $f_4$                                              | -55,81                 | -41,03                |
| $f_5$                                              | -51,97                 | -37,19                |
| $f_6$                                              | -52,68                 | -37,91                |
| $f_7$                                              | -53,35                 | -38,57                |
| $f_8$                                              | -53,40                 | -38,62                |
| Celková hladina akustického tlaku                  |                        |                       |
| Spektrální centroid a roll-off, jasnost a tonalita |                        |                       |
| $Lp$ [dB <sub>SPL</sub> ]                          | 81,26                  |                       |
| Spektrální centroid [Hz]                           | 1680                   |                       |
| Spektrální roll-off [Hz]                           | 6932                   |                       |
| Jasnost [-]                                        | 15,69                  |                       |
| Tonalita [%]                                       | 73,9                   |                       |

Harmonické spektrum, které produkuje tato vyrobená píšťala není tónově zvláště zajímavé. Při poslechu zvukového vzorku lze velmi dobře sluchem analyzovat dominující 1. a 3. harmonickou složku (v jejíž blízkosti jsou podstatné rezonanční frekvence těla nástroje), po prudkém poklesu se ve spektru dále objevuje 2. harmonická složka. Grafické zobrazení spektra (str. 60, obr. 7.2) pak zobrazuje notné zakmitání průběhu a přítomnost několika inharmonických složek (např. kolem 1100 a 1500 Hz). Energie ostatních harmonických složek v prvním pásmu je pak přibližně vyrovnaná, zajímavostí je identifikovatelný permanentní šum v tónu na kmitočtu cca 2600 Hz. Tento šum krátkodobě působí jako názvuk<sup>10</sup> u příčné flétny. Proto se zvuk hadicové flétny blíží více zvuku právě příčné flétny či fujary než zvuku flétny zobcové.

### **8.3 Analýza spektra jazykové píšťaly Hoboj – různé ozvučnice**

Zatímco předchozí dvě píšťaly byly retné, třetí analyzovaná píšťala je jazyčková. Chceme-li na zvuk píšťaly nahlížet jako na celek, je třeba mít nejdříve prozkoumané jednotlivé části nástroje, mající hlavní podíl na výsledné barvě. U jazyčkové píšťaly je to kromě materiálu hlavy, pouzdra a různých druhů výřezu především ozvučnice a jazyček.

Již několikrát byla v práci zmíněna analogie ozvučnice jazyčkové píšťaly s nátrubkovými nástroji, kdy rozměry a materiál ovlivňují frekvence rezonancí a tím pádem i výsledný tón. Vzhledem k tomu, že se s úspěchem daří vyrábět nátrubkové nástroje ze syntetických hmot, bylo na místě vytvořit jednoduchou ozvučnici pro jazyčkovou píšťalu z běžně dostupného syntetického materiálu, a to z PET lahve.

V následující tabulce s hodnotami úrovní harmonických složek v prvním pásmu bude vizualizován rozdíl ve zvuku materiálů odlišných rezonátorů. Aby bylo měření přesné, srovnání proběhne na stejném tónu, k tomu je nutné píšťalu přeladit (upravit délku kmitajícího jazyčku).

---

<sup>10</sup> Názvuk – přechodný děj trvající od inicializace tónu po jeho ustálení

Tabulka 8.3 Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – Hoboj (ozvučnice)

| Píšťala                                                                               | Hoboj jazykový   |                     |             |                     |               |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|-------------|---------------------|---------------|---------------------|
| Materiál ozvučny                                                                      | 50 % Sn, 50 % Pb |                     | PET         |                     | lesklý papír  |                     |
| Materiál jazýčku                                                                      | bronzový plíšek  |                     |             |                     |               |                     |
| Znějící tón                                                                           | a1+ (447 Hz)     |                     | a1 (441 Hz) |                     | a1 (441 Hz)   |                     |
| Úroveň vyšších harmonických složek [dB]                                               |                  |                     |             |                     |               |                     |
| Píšťala (ozvučnice)                                                                   | Hoboj (původní)  |                     | Hoboj (PET) |                     | Hoboj (papír) |                     |
|                                                                                       | $Lp_{fn}$        | $Lp_{fn} - Lp_{f1}$ | $Lp_{fn}$   | $Lp_{fn} - Lp_{f1}$ | $Lp_{fn}$     | $Lp_{fn} - Lp_{f1}$ |
| $f_1$                                                                                 | -36,23           | 0,00                | -31,94      | 0,00                | -26,93        | 0,00                |
| $f_2$                                                                                 | -35,32           | 0,91                | -42,62      | -10,68              | -27,36        | -10,68              |
| $f_3$                                                                                 | -33,68           | 2,55                | -44,71      | -12,77              | -50,72        | -12,77              |
| $f_4$                                                                                 | -43,53           | -7,30               | -46,85      | -14,91              | -49,46        | -14,91              |
| $f_5$                                                                                 | -60,82           | -24,60              | -37,79      | -5,85               | -60,62        | -5,85               |
| $f_6$                                                                                 | -51,42           | -15,19              | -43,79      | -11,85              | -50,67        | -11,85              |
| $f_7$                                                                                 | -44,00           | -7,77               | -41,18      | -9,24               | -56,53        | -9,24               |
| $f_8$                                                                                 | -55,02           | -18,80              | -57,04      | -25,10              | -58,08        | -25,10              |
| Celková hladina akustického tlaku, Spektrální centroid a roll-off, jasnost a tonalita |                  |                     |             |                     |               |                     |
| $Lp$ [dB <sub>SPL</sub> ]                                                             | 70,47            |                     | 66,75       |                     | 68,99         |                     |
| Spektrální centroid [Hz]                                                              | 3388             |                     | 2495        |                     | 1991          |                     |
| Spektrální roll-off [Hz]                                                              | 8982             |                     | 7216        |                     | 6952          |                     |
| Jasnost [-]                                                                           | 44,45            |                     | 44,27       |                     | 19,41         |                     |
| Tonalita [%]                                                                          | 64,68            |                     | 71,84       |                     | 77,47         |                     |

Srovnáme-li první tři harmonické složky, vidíme, že originální ozvučnice má úroveň těchto složek vyrovnanou, zatímco u platové ozvučnice nastává rovnoměrný pokles. Zásadní zlom přichází ve druhé polovině prvního pásma, kdy intenzita 5. harmonické složky u umělohmotné ozvučnice má druhou nejvyšší úroveň po fundamentu, zatímco u původní ozvučny je vliv 5. harmonické na celkovou barvu nevelký. To je způsobeno existencí významné formantové oblasti okolo kmitočtu 2350 Hz, která byla predikována i matematickým modelem. Přítomnost této složky ve spektru přidává nazálnost a částečně „otupuje“ jinak téměř čistý pilový tón hoboje píšťaly.

Ve třetím dvojsloupci tabulky jsou uvedeny výsledky pro „papírovou ozvučnici“. Nejedná se však o celopapírový korpus, nýbrž jen o vložení trubice z lesklého fotopapíru do širšího cylindrického průřezu. Tato malá papírová trubice funguje v prvním pásmu

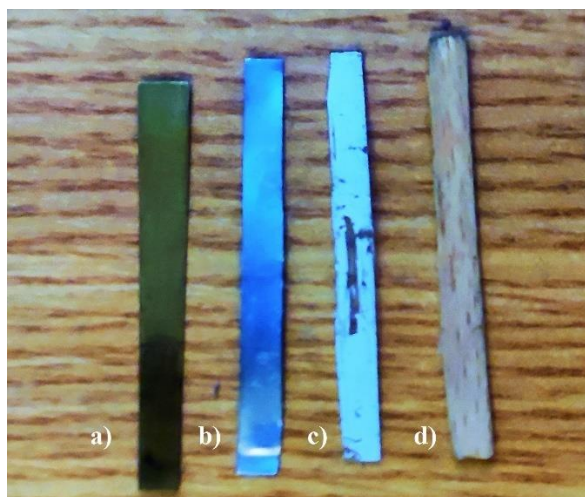
jako filtr lichých harmonických složek, dokonce dovede potlačit i výraznou 5. harmonickou složku.

Základní zvuk originální píšťaly je velmi ostrý jeho časový průběh připomíná pilový signál. To však má své opodstatnění, neboť lze počítat s tím, že v nástroji nebude fungovat samostatně, ale bude doplněn např. flétnovými rejstříky, které dovedou výsledný tón změkčit. Hobojová píšťala s PET ozvučnicí má pozoruhodně plnou barvu s výraznou intenzitou 5. a 7. harmonické složky, která činí výsledný tón samostatně použitelnější. Výsledný tón je podobnější spíše žesťovému, nežli plátkovému nástroji. Při PET ozvučnici s vloženou papírovou trubicí vzniká tón nejmohutnější, ale s nijak zvlášť charakteristickou barvou., podobnou flétnovým píšťalám.

#### 8.4 Analýza spektra jazykové píšťaly Hoboj – různé jazýčky

Jazýček plní v píšťale funkci oscilátoru. Kmitáním vzniká tzv. jazýčkový tón, který je prostřednictvím ozvučnice vyslán do prostoru. Rychlost kmitání jazýčku se odvíjí od několika zásadních faktorů: činné délky jazýčku (kmitání delšího jazýčku je pomalejší), tloušťky či šířky jazýčku a materiálových vlastností.

Pro tvorbu zvukových vzorků byly vytvořeny 3 jazýčky z různých materiálů, jako referenční vzorek posloužil pochopitelně původní bronzový jazýček. Tyto jsou vyobrazeny na obrázku (8.2).



Obr. 8.2 Jazýčky pro píšťalu Hoboj: a) bronzový, b) hliníkový, c) PET, d) dřevěný

Šířka a délka každého jazýčku byla upravena dle rozměrů jazýčku referenčního, jejich tloušťka však zůstala původní (vyjma dřevěného jazýčku, který bylo nutné ztenčit). Činná délka jazýčků byla při nahrávání vzorků upravována tak, aby se pokud možno rozezněl tón  $a_1$  (440 Hz). Aby měly analyzované vzorky vypovídající hodnotu, byl zbytek píšťaly stejný pro všechny nahrané tóny (s použitím originálního rezonátoru pro píšťalu Hoboj).

Výsledky nahraných vzorků jsou zapsány v tabulce (8.4)

Tabulka 8.4 Tabulka intenzity spektrálních složek píšťaly a dalších veličin – Hoboj (jazýčky)

|                                                                                       |                  |                       |                 |                       |                |                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Píšťala                                                                               | Hoboj jazykový   |                       |                 |                       |                |                       |
| Materiál ozvučny                                                                      | 50 % Sn, 50 % Pb |                       |                 |                       |                |                       |
| Materiál jazýčku                                                                      | PET              |                       | březové dřevo   |                       | hliník         |                       |
| Činná délka [mm]                                                                      | 18               |                       | 24              |                       | 12             |                       |
| Průměr pouzdra [mm]                                                                   | 7,2              |                       |                 |                       |                |                       |
| Šířka jazýčku [mm]                                                                    | 12               |                       | 14              |                       | 14             |                       |
| Tloušťka jazýčku [mm]                                                                 | 0,2              |                       | 0,9             |                       | 0,1            |                       |
| Znějící tón                                                                           | a1 (443 Hz)      |                       | a2 (879 Hz)     |                       | a1+ (446 Hz)   |                       |
| Úroveň vyšších harmonických složek [dB]                                               |                  |                       |                 |                       |                |                       |
| Píšťala (jazýček)                                                                     | Hoboj (PET)      |                       | Hoboj (dřevěný) |                       | Hoboj (hliník) |                       |
|                                                                                       | $Lp_{f_n}$       | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$ | $Lp_{f_n}$      | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$ | $Lp_{f_n}$     | $Lp_{f_n} - Lp_{f_1}$ |
| $f_1$                                                                                 | -50,24           | 0                     | -26,00          | 0                     | -42,50         | 0                     |
| $f_2$                                                                                 | -42,41           | 7,83                  | -36,75          | -10,75                | -43,97         | -1,47                 |
| $f_3$                                                                                 | -47,55           | 2,70                  | -37,72          | -11,72                | -35,05         | 7,46                  |
| $f_4$                                                                                 | -45,31           | 4,93                  | -49,04          | -23,03                | -49,22         | -6,71                 |
| $f_5$                                                                                 | -47,33           | 2,91                  | -46,99          | -20,98                | -52,70         | -10,19                |
| $f_6$                                                                                 | -45,28           | 4,96                  | -45,65          | -19,65                | -56,36         | -13,85                |
| $f_7$                                                                                 | -52,01           | -1,77                 | -46,33          | -20,33                | -57,38         | -14,87                |
| $f_8$                                                                                 | -48,45           | 1,79                  | -64,87          | -38,86                | -64,10         | -21,59                |
| Celková hladina akustického tlaku, Spektrální centroid a roll-off, jasnost a tonalita |                  |                       |                 |                       |                |                       |
| $Lp$ [dB <sub>SPL</sub> ]                                                             | 64,70            |                       | 72,73           |                       | 63,51          |                       |
| Spektrální centroid [Hz]                                                              | 5553             |                       | 5201            |                       | 5355           |                       |
| Spektrální roll-off [Hz]                                                              | 12849            |                       | 12312           |                       | 12352          |                       |
| Jasnost [-]                                                                           | 79,81            |                       | 27,11           |                       | 52,25          |                       |
| Tonalita [%]                                                                          | 43,20            |                       | 53,92           |                       | 43,52          |                       |

Spektrum referenčního jazýčku je zhodnoceno v předešlé podkapitole. V případě nahrávání plastového jazýčku bylo nutné dávat pozor na tlak vzduchu posílaný do píšťaly, neboť při větším tlaku docházelo k absolutnímu přitlaku jazýčku na šterbinu a tón se

přestal ozývat. Úroveň jednotlivých spektrálních složek je v rámci prvního pásma srovnatelná, rozdíl mezi nejslabší a nejsilnější harmonickou složkou činí 10 dB. Podobnou úroveň těchto složek je možné pozorovat až po přibližně 30. harmonickou složku, poté se spektrum stává šumovým. Tón je zvukově bohatý, od referenčního vzorku odlišný především intenzitou harmonických složek ve 2. pásmu. Obecně však lze tento zvukový vzorek posoudit jako nepříliš tonální.

Přestože proběhla snaha o sjednocení analyzovaného tónu, u dřevěného jazýčku se podařilo vybudit až tón o oktávu vyšší. Pro vybudění tónu bylo naopak nutné vyvinout vyšší tlak vzduchu, aby se podařilo jazýček rozkmitat. Výsledný tón je barevně reprezentován především oblastí 1. až 7. harmonické složky, poté následuje skokový pokles úrovní vyšších harmonických složek. Tvar vlny je podobný téměř čistému pilovému průběhu.

Hliníkový jazýček má v prvním pásmu dominující 3. harmonickou složku, jinak úroveň ostatních složek postupně klesá. Přibližně ve druhé polovině druhého pásma dochází k poklesu harmonických složek na úroveň šumu.

Pozice spektrálního centroidu a roll-offu jsou u všech tří vzorků podobné, referenční vzorek má centroid i roll-off umístěn na nižším kmitočtu. Díky přítomnosti inharmonicit u jazýčku plastového a hliníkového (čili tenčích jazýčků než referenční) je vyjádření tonality poměrně nízké. U dřevěného jazýčku je tato hodnota příjemnější, rozdíl oproti vzorku bronzového jazýčku s PET ozvučnicí však činí více než 20 %.

Obecně lze tvrdit, že zvuk generovaný z bronzového plechu je po stránce barvy zvuku zdaleka nejkvalitnější.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se teoreticky i prakticky věnovala konstrukčním postupům a prvkům retných a jazýčkových varhanních píšťal s přihlédnutím k vlivu materiálu a fyzických rozměrů na výslednou zvukovou barvu.

Úvodní kapitoly popisují varhanní mechanismus a konstrukční prvky retných i jazýčkových píšťal. Dále lze v textu nalézt několik doporučení pro správný postup při výrobě nových píšťal.

Následně byla provedena prvotní analýza, aby čtenář získal povědomí o možnosti popisu zvuku. Pro tuto analýzu proběhl výběr píšťal typických tvarů, vyrobených ze standardních materiálů, včetně uvedení jejich mechanických vlastností, na které je vhodné při konstrukci píšťal pamatovat.

Následovalo provedení spektrální analýzy 4 vybraných zvukových vzorků různých píšťal záměrně tak, aby se dva vzorky svou konstrukcí navzájem podobaly, avšak byly svou zvukovou barvou nestejně a tyto rozdíly jsou dány do souvislosti s rozměrovými a materiálovými odlišnostmi. I třetí zvukový vzorek byl pořízen retnou píšťalou, avšak od předchozích vzorků tvarem i materiálem naprosto odlišnou. Zvuková barva byla u tohoto zvukového vzorku spojena s konstrukčními a materiálovými vlastnostmi, kde se prakticky potvrdila část teoretických tezí o konstrukci retných píšťal. Kontrastně byla do výběru zařazena jedna píšťala jazýčková, která je svou konstrukcí a zvukovým témbrem od retných píšťal velmi odlišná. V rámci analýzy došlo k určení polohy energetického těžiště ve spektru a výpočtu hodnot vybraných psychoakustických veličin, jako je jasnost či tonalita.

Pro účely konstrukce nových píšťal bylo nutné vybrat použitelné materiály a definovat jejich mechanické vlastnosti. V zájmu zjištění hodnoty rezonančních kmitočtů u konstruovaných píšťal byla prostřednictvím softwarového balíku Ansys 2021 R2 provedena simulace rezonátorů jak retných, tak i jazýčkových píšťal u každého modelu došlo k provedení modální analýzy a harmonické odezvy na základě předem definovaných počátečních podmínek. Výsledkem je získání teoretických hodnot rezonančních kmitočtů, podle kterých lze predikovat zvukový témbra budoucích fyzických píšťal.

Dle poznatků o konstrukci retných píšťal proběhla výroba 2 funkčních vzorků retných píšťal a nové ozvučnice k jazýčkové píšťale. Zároveň se podařilo vyrobit 3 druhy jazýčků pro jazýčkovou píšťalu, u kterých též došlo k provedení spektrální analýzy a následného popisu získaného zvukového tónu.

Při spektrální analýze vyrobených a upravených píšťal došlo k nalezení souvislosti mezi vypočítanou hodnotou rezonančních kmitočtů u modelu a jejich reálnou hodnotou detekovatelnou prostřednictvím lineárního prediktivního kódování. Bylo tak možné určit vliv rezonančních kmitočtů na výslednou barvu zvuku.

## LITERATURA

- [1] BLAŽEK, Jaroslav, Základy stavby varhan: I. díl – Materiály používané při stavbě varhan, Skříně hracích stolů. Krnov, 1982 Varhany Krnov
- [2] BERNAT, Petr. Anatomie varhan [online], Ostrava, 2001–2010 [cit. 2021-12-13], Dostupné z: <http://www.anatomie-varhan.cz>.
- [3] BRABEC, Petr, BARTŮŇEK, Filip, Rozdělení pevných látek [online], 2021 [cit. 2021-12-13], Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/struktura-a-vlastnosti-latek/rozdeleni-pevnych-latek>.
- [4] BUREŠ, Jiří. Hustota pevných látek [online], 2002, [cit. 2021-12-13], Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>
- [5] ČAJAN, Ondřej. Tepelné a mechanické vlastnosti ABS [online]. Ostrava 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94765149.pdf>. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Fakulta materiálově-technická.
- [6] DESIGNERDATA.NL: PVC soft – Thermo plastics, PET – Thermo plastic [online]. neznámé, [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyvinyl-chloride-soft> a <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyethylene-terephthalate>
- [7] HOFFMAN, Pavel. Inovace žebroví kytary Dreadnought [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/197103>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [8] CHLÁPEK, Svatopluk, Základy stavby varhan: III. díl – Vzdušnice, rozvod a usazení. Krnov, 1982 Varhany Krnov
- [9] CHLÁPEK, Svatopluk, Základy stavby varhan: VI. díl – Varhanní a žaluziové skříně, Skříně hracích stolů. Krnov, 1982 Varhany Krnov
- [10] JEŘÁBEK, Tomáš. Varhany firmy Rieger v Jihomoravském kraji. Brno, 2020. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Fakulta filozofická. Ústav hudební vědy. Vedoucí práce PhDr. Petr Kalina, Ph.D.
- [11] JIRÁSEK, Ondřej: Mixujeme a mástrujeme: co mohu vyčíst ze spektra? [online], Brno, 2021 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://magazin.disk.cz/cs/mixujeme-a-mastrujeme-co-mohu-vycist-ze-spektra>
- [12] PLÁNSKÝ, Bohumil, Zařízení varhan: I. díl – Píšťaly. Krnov, 1978 Varhany Krnov.
- [13] POŽGAJ, Alexander et al. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [14] PRVKY.COM: Tvrdost a pružnost některých kovů [online], 2021 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/tvrdost-kovu.html>.
- [15] SMÉKAL, Z. Analýza signálů a soustav. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [16] SOMMER, Tomáš. Analýza srovnání spekter flétnových varhanních píšťal. Brno, 2018, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

- [17] SUCHÁNEK, Tomáš. Analýza spektra klarinetů od různých výrobců. Brno, 2019, 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [18] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. Praha, 2013, Akademie múzických umění, Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [19] ŠTEFEK, Oldřich, Základy stavby varhan: VII. díl – Traktura. Krnov, 1982 Varhany Krnov.
- [20] WIECHMAN, K. Evaluation and visualisation of ERP in  $\mu$ ETA [online], neznámý [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: [https://www.betacae.com/events/c4pdf/6\\_2\\_wiechmann.pdf](https://www.betacae.com/events/c4pdf/6_2_wiechmann.pdf)

## **PŘÍLOHY**

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>PŘÍLOHA A - KONSTRUKČNÍ PRVKY JAZYKOVÝCH PÍŠŤAL.....</b> | <b>79</b> |
| <b>PŘÍLOHA B - OBSAH PŘILOŽENÉHO .ZIP SOUBORU .....</b>     | <b>81</b> |

# Příloha A - Konstrukční prvky jazykových píšťal

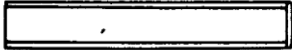
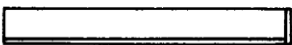
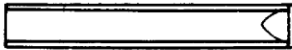
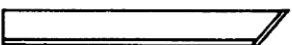
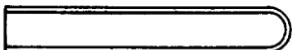
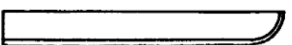
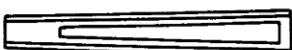
## A.1 Typy jazýčkových pouzder

### a) DLE TVARU A ZAKONČENÍ POUZDRA :

Pohled ze zhora:

Pohled z boku:

Typ:

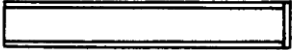
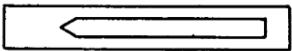
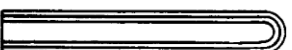
- |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 1.    | 1. <u>NĚMECKÝ</u> (deutsche Kehle, German shallot)                                       |
|    | 2.    | 2. <u>LODIČKOVÝ</u> (Schiffchen Kehle, "Schiffchen" shallot)                             |
|    | 3.    | 3. <u>FRANCOUZSKÝ</u> (französische Kehle, French shallot)                               |
|  | 4.  | 4. <u>ANGLICKÝ</u> - "SLZA"<br>(zavřené provedení)<br>(englische Kehle, English shallot) |

### b) DLE ZPŮSOBU UZAVŘENÍ :

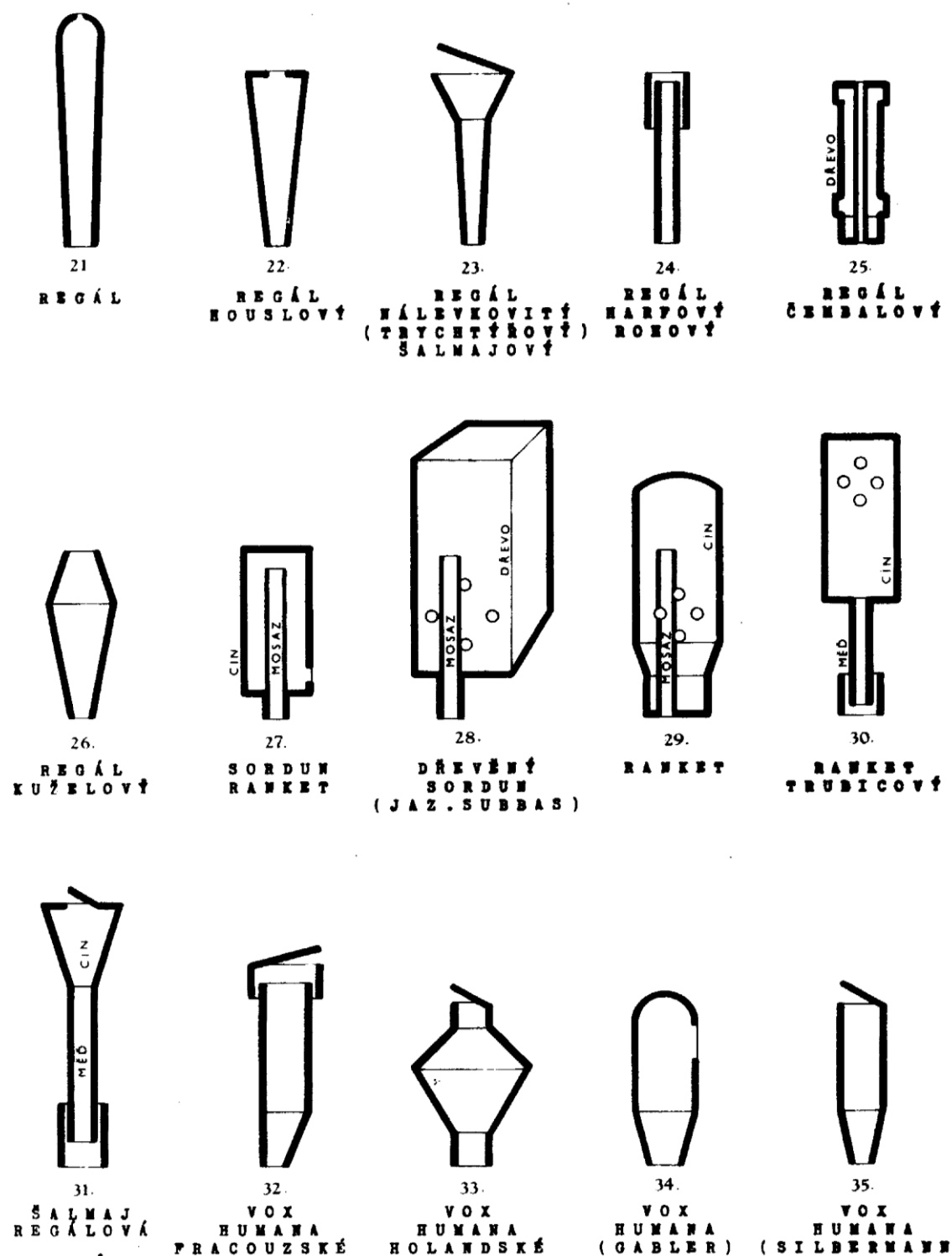
Pohled ze zhora:

Řez v ose pouzdra:

Typ:

- |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | A.  | A. <u>OTEVŘENÝ</u> (offen, open)                                                                                                                     |
|  | B.  | B. <u>ČÁSTEČNĚ UZAVŘENÝ</u><br><u>VYLOŽENÍM</u> (vyložení tvrdé=mosaz, cín - vyložení měkké=dřevo, kůže a pod.) (teilweise geschlossen, "filled in") |
|  | C.  | C. <u>UZAVŘENÝ</u> - "DUTÉ POUZDRO"<br>(německý typ)<br>(geschlossen-Hohlkehle, closed)                                                              |
|  | C.  | C. <u>UZAVŘENÝ</u><br>(francouzský typ)<br>(geschlossen-Hohlkehle, closed)                                                                           |

## A.2 Typy jazýčkových ozvučen – krátké regály



Zobrazení spekter vytvořených píšťal

## **Příloha B - Obsah přiloženého .zip archivu**

Archiv Prilohy.zip obsahuje:

- M-files pro výpočetní software Matlab (složka, 5x soubor .m)
- Odkaz ke stažení souborů ANSYS (.txt)
- Vyobrazení spekter modelovaných píšťal (složka, 4x soubor .jpg)
- Analyzované zvukové vzorky (složka, 15x soubor .wav)
- Textový dokument Obsah\_archivu\_Prilohy.zip.txt