

ZÁKLADY HUDEBNÍ AKUSTIKY

Prof. PhDr. Pavel Kurfürst, CSc.

BRNO 2000

Obsah

Předmluva	5
1. Hudebně akustické minimum pro organology	5
2. Hudební nástroje jako akustické zdroje	16
3. Vlčí tón	27
4. Stopová míra	29
5. Frekvenční normál	30
6. Přirozená řada tónů	31
7. Tabulka hladin hlasitosti ve fonech	32
8. Velká a malá diesis	33
9. Tabulka frekvencí tónů dvanáctistupňového temperovaného ladění	33
10. Porovnání fyzikálního, přirozeného a temperovaného ladění	36
11. Vzestupné seřazení základních intervalů v přirozeném, pythagorejském a temperovaném ladění.	37
12. Tónové rozsahy některých dnes užívaných hudebních nástrojů	38
13. Ladění některých dnes užívaných hudebních nástrojů	40
14. Akustický výkon některých hudebních nástrojů	41

Předmluva

V prosinci roku 1998 vyšla v nakladatelství *Georgius* v Hradci Králové obsáhlá učebnice *Organologie (propedeutika, exemplifikace)*, jejíž poslední kapitoly byly věnovány hudební akustice přibližně v rozsahu přednášeném v Ústavu hudební vědy FF MU. Přes relativně velký náklad byla učebnice během necelých tří měsíců zcela rozebrána, takže studenti následujících ročníků ztratili možnost ji používat. Ve snaze napravit tento stav, jsou FF MU vydána tato skripta *Základy hudební akustiky*, do nichž jsou po úpravách převzaty zmíněné, hudební akustice věnované, kapitoly.

V Brně 11. ledna 2000

Prof. PhDr. Pavel Kurfürst, CSc.

1. HUDEBNĚ AKUSTICKÉ MINIMUM PRO ORGANOLGY

Základy hudební akustiky uvádím v jednotlivých bodech, které zahrnují jen ty nejjednodušší základy oboru, bez nichž se nelze v organologii obejít. Podrobněji se tomuto oboru věnuje *Antonín Špelda* ve své publikaci *Hudební nástroje* (Praha 1978).

1. Definice: *Hudební akustika v širším slova smyslu dnes zahrnuje základní poznatky z nauky o mechanickém kmitání a vlnění, akustické zákonitosti ve stavbě intervalů, stupnic a tónových soustav, akustiku hudebních nástrojů, základy fyziologické a senzorické akustiky a základní informace z prostorové akustiky a elektroakustiky.*
2. Jednoduchý kmit. Je to pohyb myšleného pružného bodu z rovnovážné polohy do největší výchylky (*amplitudy*), odtud přes rovnovážnou polohu do druhé, opačné amplitudy a zpět do rovnovážné polohy.
3. Doba kmitu. Je doba potřebná k vykonání jednoho kmitu. Nazývá se též *perioda*.
4. Frekvence (kmitočet) je *počet kmitů za jednu sekundu*.
5. Jednotka frekvence f je Hz (Hertz). Je pojmenována po německém fyzikovi *Heirichu Hertzovi* (1857–1894). Je to *jeden kmit za jednu sekundu*. Jednotky vyšší jsou: 1 kHz (=10³Hz), 1 MHz (=10⁶Hz), 1 GHz (=10⁹Hz). V hudební akustice se po užívají jen jednotky ve slyšitelném pásmu – Hz, kHz.

6. Jednoduchý kmit (sinusový, harmonický) má časový průběh ve tvaru sinusoidy. Takový průběh tónu je produkován pouze tónovými generátory. U hudebních nástrojů se mu nejvíce blíží zvuk příčné flétny.
7. Složený kmit se skládá z několika sinusových kmitů různých frekvencí, které vnímáme jako jediný tón. Hudební nástroje produkují výhradně kmity složené.
8. Fázový posuv u kmitavého pohybu. Začíná-li průběh např. si nusovky největší výchylkou, je posunut vůči normálu o 90° . Jestliže se setkají dva stejné tónové průběhy, které jsou vůči sobě posunuty o 180° (o půl periody) a mají stejnou amplitudu, vyruší se (nejsou slyšet). Tyto případy mohou nastat např. v koncertních sálech, kdy se odražený signál dostane do ucha posluchače v opačné fázi proti signálu přímému (užitečnému), který je tím podstatně zeslaben.
9. Tlumené kmity jsou kmity, jejichž amplituda s rostoucím časem postupně klesá k nule (drnknutí nebo úder na strunu).
10. Netlumené kmity jsou kmity, jejichž amplituda je v časovém průběhu stále stejná (struna rozeznívaná smyčcem).
11. Vlastní kmity, vlastní rezonance. Každé těleso, struna, vzduchový sloupec je možné vnějším impulsem rozkmitat na frekvenci, která je dána objemovou hmotností, tvarem, objemem ev. napětím (struny).
12. Nucené kmity jsou např. kmity vnucené bodům ozvučných skříní nebo vzduchovým sloupcům kmitáním struny, plátku atd. Tyto nucené kmity jsou tedy vyvolány vlastními kmity struny, plátku.
13. Mechanická rezonance, rezonanční efekt vzniká, jestliže kmitavý systém (např. struna), vydávající vlastní kmity (oscilátor), vnucuje kmity např. ozvučné skříně (rezonátoru) a to i bez přímé mechanické vazby. Správná rezonanční skříně hudebního nástroje má velký počet vlastních rezonancí, takže může zesilovat většinu tónů produkováných oscilátorem. Rezonančního efektu je také např. využíváno u nástrojů se souznějícími strunami (viola d^oa mour).
14. Formanty jsou zvlášť výrazné rezonance rezonančních skříní hudebních nástrojů. Jsou neměnné a pro každý typ nástroje typické.
15. Netlumený rezonátor rezonuje velkými amplitudami jen v úzké oblasti kmitočtů.
16. Tlumený rezonátor reaguje na široké spektrum tónů, i když, menšími amplitudami.
17. Odráž zvukové vlny na rovinném rozhraní podléhá pravidlu, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Část vlny je rovínou pohlcena, což závisí na materiálu a pružnosti roviny. Čím je rovina tužší, tím více energie se

odrazí. Tohoto jevu se využívá při návrzích a stavbě rozhlasových studií, kon certních sálů, mrtvých komor atd.

18. Zázněje, rázy, interference. Vznikají při skládání dvou vln velmi blízkých frekvencí (do rozdílu asi 20 Hz, tj. asi 2%). Vlny se tak skládají, že v určitém okamžiku se tvoří maximum amplitudy, v dalším minimum a tento děj se periodicky opakuje. Doba jednoho zázněje je časová vzdálenost mezi dvěma sousedními maximy nebo minimy. Frekvence zázněje se rovná rozdílu zúčastněných frekvencí. Tohoto jevu se využívá například při ladění sborových strun klavíru atd. (ladění na nulový zázněj).
19. Zvuk. Lidský sluch je schopen vnímat (podle stáří jedince) vlnivé rozruhy prostředí ve frekvenčních mezích 16 Hz (10 Hz) až 16 kHz (24 Hz) – (dolní sluchová mez – horní sluchová mez). Akustické rozruhy s kmitočty pod frekvencí 16 Hz jsou infrazvuky, s kmitočty nad frekvencí 16 kHz jsou ultrazvuky.
20. Tónový rozsah užívaný v hudbě leží mezi frekvencemi 16 Hz a 4 kHz. Všechny tóny zde obsažené jsou v rozsahu osmi oktáv – od subkontra C (C₂) do c⁵.
21. Hluk je zvuk vyvolaný nepravidelnými, neperiodickými tlakovými změnami v prostředí. Zvuk je nadřazen hluku.
22. Šum je zvuk sestávající z velkého počtu frekvencí (relativně vysokých), navzájem velmi blízkých. Zvuk je nadřazen šumu.
23. Tón je zvuk vyvolaný periodickými tlakovými změnami v prostředí. Zvuk je nadřazen tónu.
24. Síla tónu. Vnímaná výška tónu neodpovídá vždy jeho kmitočtu, může být závislá i na síle tónu. Jev vzniká nedokonalostí sluchového aparátu. Obecně síla tónu závisí na amplitudě zvukového vlnění, tj. na velikosti impulsu, který vlnění vyvolává. Sílu tónu měříme řadou veličin, objektivních i zcela subjektivních:

Veličina	Symbol	Jednotka
Intenzita tónu	I	μ W (mikrowatt)
Hladina intenzity tónu	B	dB (decibel)
Hladina hlasitosti tónu	P	Ph (fón)
Subjektivní hlasitost tónu	S	son

25. Intenzita tónu I je akustický výkon připadající na plošnou jednotku. Jde o jednotku objektivní, fyzikální. Měří se v jednotkách výkonu (TW). Je

25. Intenzita tónu I je akustický výkon připadající na plošnou jednotku. Jde o jednotku objektivní, fyzikální. Měří se v jednotkách výkonu (TW). Je přímo úměrná druhé mocnině akustického tlaku p zvukového vlnění, který se udává v mikrobarech (1 mikrobar = 1 dyn/cm²).
26. Práh sluchového pocitu, práh slyšitelnosti p₀ je nejmenší tlak, který je sluchový orgán schopen zaznamenat. Pro referenční tón 1 kHz má velikost 2 · 10⁻⁴ mikrobaru.
27. Práh bolestivosti je nejvyšší tlak, který ucho snese bez pocitu bolesti a je pro referenční tón 1 kHz roven 10³ mikrobaru.
28. Hladina intenzity B je dána logaritmem poměru intenzity tónu I k intenzitě odpovídající prahu slyšitelnosti I₀: $B = \log I/I_0$. Vzhledem k přímé úměrnosti mezi I a p², lze hladinu intenzity vyjádřit $B = 2 \cdot \log p/p_0$.
29. Bel (decibel). Hladina intenzity tónu se měří v belech. Angličan *Graham Bell* (1847–1922) vynalezl v roce 1875 telefon. Hladina intenzity vzroste o 1 bel, když se původní intenzita tónu zesetonásobí. Jde o logaritmickou závislost, která je výhodná a přehledná, protože převádí geometrické vztahy na vztahy aritmetické. Člověkem vnímaná hlasitost roste při geometrickém zvyšování intenzity podle aritmetické posloupnosti. Lidské ucho dovede od sebe rozeznat dva různě silné referenční tóny za sebou ještě i tehdy, když se rozdíl jejich hladin intenzity rovná asi desetině belu. Proto byla zavedena jednotka „jemnější“ 1 decibel (dB).
30. Hladina hlasitosti. Kdyby bylo lidské ucho stejně citlivé na všechny kmitočty, udávala by hladina intenzity tónu i tzv. hladinu hlasitosti. Jelikož však ucho má různou citlivost pro různé zvukové frekvence, bylo nutné zavést pojem hladiny hlasitosti P. Určuje se tak, že pro referenční tón souhlasí s hladinou intenzity, pro tóny ostatní se určuje subjektivním srovnáním s hladinou hlasitosti referenčního tónu. Měří se ve fonech (Ph). Tón má hladinu hlasitosti x fónů, jeví-li se uchu stejně silný jako referenční tón s hladinou intenzity x decibelů.

Zvuk	Hladina hlasitosti ve fonech
práh slyšitelnosti	0
šepot	10–15
dětský hlas, zvuk houslí	40
středně silná řeč	50–60
symf. orchestr při ff	80–90
hluk těsně u letadla	110–130

- Silné tóny kolem 100 Ph nevykazují podstatné odchylky mezi B a P. Hladina jejich hlasitosti se přibližně rovná hladině intenzity 100 dB v celém slyšitelném rozsahu, tedy nejen pro referenční kmitočet 1 kHz. Jestliže se postupuje k tónům slabším, porušuje se tato rovnost. Tóny dvoučárkované a jednočárkované oktávy vyžadují nižší hladinu intenzity, než je jejich hladina hlasitosti. U tónů nižších je tomu naopak.
31. Subjektivní hlasitost tónu. Praxe ukazuje, že např. silový rozdíl tónů o 90 a 100 dB (Ph) se jeví mnohem větší, než např. mezi tóny 5 a 15 dB (Ph). To si vyžádalo vytvoření nové empirické stupnice subjektivní hlasitosti, měřené v *sonech*. Hlasitost jednoho sonu má referenční tón při hla dině intenzity 40 dB. Hlasitost 2 sony má zvuk, který se jeví dvakrát silnější. Bylo zjištěno, že dvojnásobnou subjektivní hlasitost vykazuje tón, jehož hladina hlasitosti vzrostla o 10 Ph. Z toho plyne, že hladině hlasitosti 50 dB odpovídá subjektivní hlasitost 2 sony, 60 dB – 4 sony, 70 dB – 8 sonů, 80 dB – 16 sonů, 90 dB – 32 sony, 100 dB – 64 sony, 110 dB – 128 sonů, 120 dB – 256 sonů. Sonová stupnice nejlépe odpovídá subjektivnímu hodnocení síly tónu.
32. Barva zvuku, témbur, spektrální složení tónu. Barvou zvuku rozlišujeme zvuk různých hudebních nástrojů. Jde o rozeznání (rozlišení) různých zvukových kvalit. Tóny v hudbě jsou vždy tóny složené. Jejich barva závisí na spektrálním složení tónu a to především na:
- počtu a intenzitě harmonických tónů,
 - na produktech tzv. vedlejších (vyprovokovaných) oscilátorů,
 - na charakteristických šumech a šelestech vzniklých např. tahem smyčce, úderem paliček atd.,
 - na přechodových jevech na začátku a na konci tvoření tónu, kdy ve velmi malých časových úsecích se mění počet a velikost amplitud jednotlivých harmonických tónů, obsažených v daném složeném tónu,
 - na formantech, tj. rezonančních oblastech rezonátorů či těles nástrojů.

f) na tónech, které sebou nesou superpoziční kmitočty.

33. **Harmonické tóny** (částkové, parciální, alikvotní) jsou tóny, které provázejí a jsou obsaženy s různými amplitudami v každém složeném tónu. Jde o tóny v tzv. harmonické řadě, například:

1.	harmonický tón (základní)	110 Hz	A
2.	harmonický tón	220 Hz	a
3.	harmonický tón	330 Hz	e ¹
4.	harmonický tón	440 Hz	a ¹
5.	harmonický tón	550 Hz	cis ²
6.	harmonický tón	660 Hz	e ²
7.	harmonický tón	770 Hz	g ²
8.	harmonický tón	880 Hz	a ²

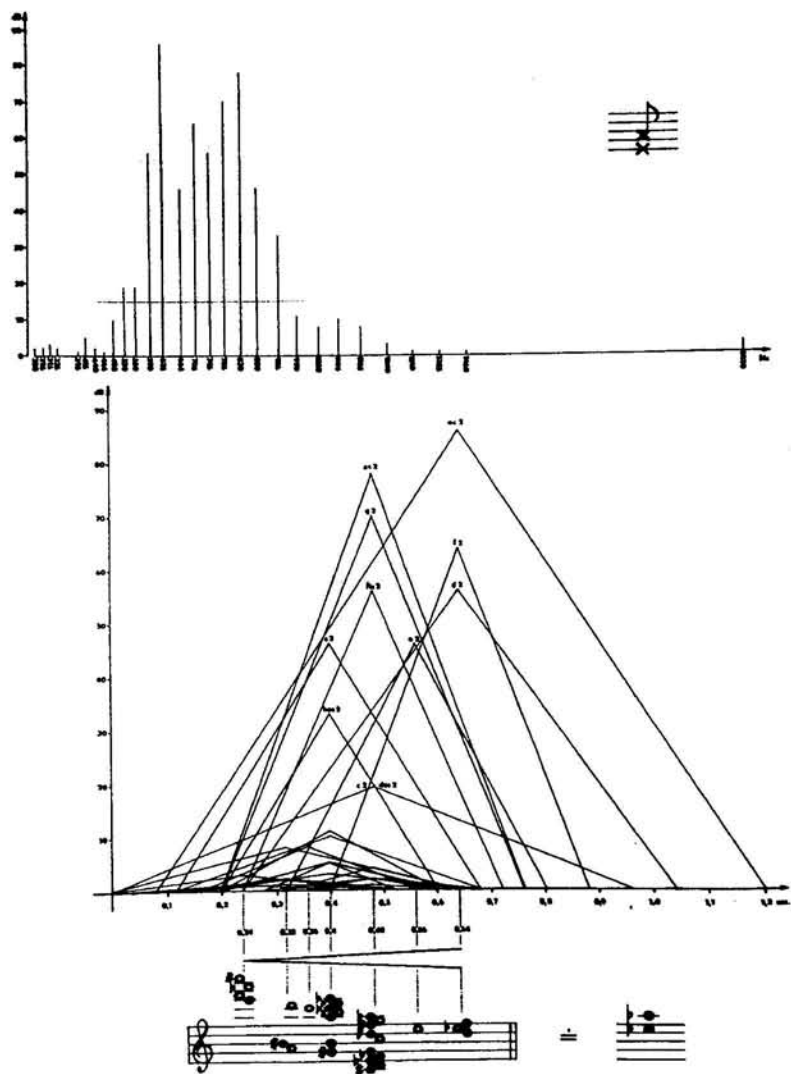
Rozdíl kmitů mezi sousedními harmonickými tóny činí vždy tolik kmitů, kolik jich má základní, výchozí (1.harmonický) tón. Zde je zajímavá souvislost: zatímco rozdíl kmitočtů je mezi sousedními harmonickými tóny vždy stejný, jejich intervaly se směrem k vyšším stále zmenšují.

34. **Cent.** V hudební teorii a zejména při akustických měřeních je často nutné dělit interval temperovaného půltónu na menší jednotky. Interval temperovaného půltónu byl tedy rozdělen na sto stejných dílů – centů. Celá oktáva, dvanáct půltónů, tak obsahuje 1200 centů.
35. **Dynamický rozsah** hudebního nástroje jsou všechny dynamické možnosti, obsažené mezi jeho horní a dolní mezí dynamiky. Rozpětí dynamiky udává rozdíl hodnot těchto mezí. Např. nejnižší dosažitelná hladina intenzity hudebního nástroje je 55 dB, nejvyšší 85 dB. Jejich rozdíl – 30 dB označujeme jako rozpětí dynamiky.
36. **Stupně dynamiky** u hudebních nástrojů. Intenzitu zvuku nejčastěji měříme logaritmicky. Pro stupně dynamiky hudebních nástrojů bylo nutné najít vhodnou objektivní stupnici v dB. V praxi neklesá hladina „ticha“, hladina hluku pozadí, pod 40 dB. Nemůže mít tedy nejnižší stupeň dynamiky menší hodnotu (nebyl by slyšet). Nejvyšší stupeň zase nemůže, až na výjimky (varhany), překročit hodnotu kolem 100 dB. Není zde brána v úvahu hudba elektronická, kde se často zvuk zesiluje nad fyziologicky únosnou mez a stává se nesnesitelný a nebezpečný. Jednotlivým známým stupňům dynamiky byly přiřazeny tyto přibližné decibelové hodnoty:

ppp	40 dB	mf	70 dB
pp	50 dB	f	80 dB
p	60 dB	ff	90 dB
mp	65 dB	fff	100 dB

Každý stupeň má volnost v mezích ± 5 dB. Výjimku tvoří stupně p, mp, mf, kde volnost činí nejvýše $\pm 2,5$ dB.

37. **Směrové charakteristiky** hudebních nástrojů. Vyzářování akustické energie hudebních nástrojů se měří ve vodorovné a ve svislé rovině při různých frekvencích. Ke snímání signálu se používá mikrofonu, jehož výstupní údaje jsou zaznamenávány. Při grafickém znázornění jsou spojována místa stejné intenzity zvuku, takže vznikne *vyzařovací diagram* hudebního nástroje při různých frekvencích. Diagram je závislý na prostředí, proto se tato měření uskutečňují na volném prostranství nebo v *mrtvých (bezodrazových) komorách*. Vyzářovací diagramy mají význam pro výrobce hudebních nástrojů, pro rozhlasovou praxi atd.
38. **Subjektivní kombinační tóny.** Vzdálí-li se frekvenčně od sebe dva současně znějící tóny tak, že již nevznikají zázneje, tj. o více než 20 Hz, jsou uchem vnímány jako dva samostatné tóny (f_1, f_2). Současně s nimi je však vnímán ještě třetí tón s frekvencí $f_1 - f_2$. Je to rozdílový, diferenční tón, který vzniká v uchu díky nelinearitě sluchového orgánu. Proto nelze tento *subjektivní diferenční tón* změřit. Někdy, pokud je to v rámci slyšitelné oblasti, vnímáme i tón součtový $f_1 + f_2$, *subjektivní sumační tón*. Souhrnně jsou subjektivní diferenční a sumační tóny nazývány *tóny kombinační*, někdy také *Tartiniho tóny* podle italského houslisty *Giuseppe Tartiniho* (1692–1770), který je pozoroval a popsal v roce 1754. Poprvé je popsal v roce 1741 německý varhaník a teoretik *Georg Andreas Sorge* (1703–1778). Subjektivních diferenčních tónů je často vy užíváno např. při stavbě velkých varhan, kdy se neosazují nejdelší píšťaly pro subkontraoktávu. Místo nich se uvádějí v činnost dvě píšťaly kontraoktávy, jejichž frekvenční rozdíl vytváří v uchu tón subkontraoktávy. Protože u složených tónů se vyskytují především svrchní harmonické tóny o kmitočtech 2f, 3f, 4f ... , mohou vznikat diferenční tóny i z dvojic 3f–2f, 4f–3f atd. Rozdíl jejich frekvencí je 1f, tj. základní tón, který pak vnímáme daleko silněji.



Obr.1 Výsledek akustické analýzy přefukovaného tónu dětvanské fujary včetně všech subjektivních kombinačních tónů.

39. Maskování tónu tónem nebo hlukem. Silnější tón téže frekvence přehluší tón slabší. To znamená, že se hlasitosti těchto tónů jednoduše v uchu nesčítají, ale že slyšíme tón s vyšší hlasitostí, pokud převyšuje tón s nižší hlasitostí alespoň o 7 dB. Maskovací efekt však nemusí vznikat jen u tónů stejné frekvence. U tónů rozdílných výšek musí maskující tón mít o 10 dB větší hlasitost. Pokud je tón maskován hlukem, tak hlasitost hluku musí být o 20 dB vyšší. Při orchestraci a při provádění vokálních děl je důležité zabránit maskování zpívané nebo mluvené řeči zvukem orchestru, neboť současně klesá i srozumitelnost mluvené či zpívané řeči. Řeč kryjí nejvíce tóny s kmitočty 100–500 Hz, tj. tóny ve frekvenční oblasti řeči. Při velkých intenzitách se jeví maximum maskování kolem 300 Hz, při nízkých hladinách dynamiky u 500 Hz. Při zpívané nebo mluvené řeči by měla být hladina vokálního projevu vždy aspoň 10 dB nad hladinou orchestrálního zvuku, nemá-li se stát zpěv nesrozumitelným.
40. Modulace tónů u hudebních nástrojů je možná trojí: *frekvenční (vibrato)*, *amplitudová (tremolo)* a *modulace superpozicí*, přičemž první dvě jsou v odborné literatuře většinou ztotožňovány nebo vzájemně zaměňovány, zatímco třetí není zmiňována vůbec. Autorům však nelze nic zazlívat, protože termíny vibrato (z lat. vibro = mihat, kmitat, chvět, třást) a tremolo (z lat. tremo = třást se, chvět se) jsou významově prakticky shodné. V praxi se však většinou zavedlo užívat termínu vibrato pro frekvenční modulaci tónu a termínu tremolo pro modulaci amplitudovou.
- a) frekvenční modulace (vibrato) je kolísání frekvence hraného tónu v rozmezí až 50 centů, které probíhá asi pětikrát za sekundu. Současně se změnou frekvence kolísá při vibratu také dynamika, ale dynamické změny neprobíhají souběžně se změnami výšky. Dynamické variace u vibrata jsou však zcela nepatrné – asi 2 dB. Dominující jsou změny frekvence. S vibratem se lze setkat zejména při hře na smyčcové nástroje.
- b) amplitudová modulace (tremolo) je kolísání dynamiky hraného tónu v rozmezí až 5 dB, které probíhá asi třikrát až osmkrát za sekundu. S tremolem se lze zejména přihnout na dechové nástroje a u některých rejstříků varhan. Nejvýrazněji se však tremolo trvale uplatňuje u vibrafonu, i když jeho název spíše napovídá na frekvenční modulaci, která však u tohoto nástroje nemůže uplatňovat.
- c) modulace superpozicí vzniká jen v několika málo případech, zejména u některých nástrojů s vedlejšími oscilátory a u regálových píšťal, na-

stavených jistým způsobem. V podstatě jde o to, že vyšší frekvence vedlejších oscilátorů, zpravidla bzučivého a drnčivého charakteru, nevytvářejí s frekvencemi základních oscilátorů nástroje složené kmity, ale že se superponují na sebe. Je to jakési „nabalování“ frekvencí vyšších na nižší.

41. **Přirozené ladění.** Uplatnění *harmonického principu* při stavbě tónové soustavy. Na rozhraní 15. a 16. století se začalo stále výrazněji prosazovat v evropské hudbě vedle pythagorejského ladění *ladění přirozené – aristoxenovské* (Aristoxenos, 2. pol. 4. stol. př. n. l.). Zvláště dílo benátského kontrapunktika *Gioseffa Zarlina* (1517–1590) *Istituzioni harmoniche* (1558) učinilo průlom do pevných pozic obhájců *pythagorejské (kánonické) tónové soustavy*. Výběr tónů přirozeného ladění není náhodný, je odvozen z řady alikvotních tónů, které tvoří přirozený a tedy dokonale konsonantní souzvuk. *Přirozené* ladění tedy proto, že většinu intervalů zní lidskému uchu příjemně. Intervalové poměry durové stupnice v přirozeném ladění:

stupeň	interval k základnímu tónu
prima	1:1
sekunda	9:8
tercie	5:4
kvarta	4:3
kvinta	3:2
sexta	5:3
septima	15:8
oktáva	2:1

Nevýhodou přirozeného ladění je, že v něm existuje dvojnásobná hodnota pro interval celého tónu. Celý tón je totiž stanoven poměrem 9:8 (*velký celý tón*), nebo poměrem 10:9 (*malý celý tón*). Rozdíl mezi nimi, vyjádřen poměrem 81/80 se nazývá *syntonické komma* nebo *didymické komma* (Didymos, nar. r. 63 př. n. l.). Rovná se jedné padesátině oktávy, tj. asi jedné sedmině celého tónu. Je to rozdíl malý, ale uchem po střehnutelný. Kromě toho není rozdíl mezi velkou a malou tercií roven půltónu. Velká tercie (c–e) je dána poměrem 4:5, malá tercie (c–es) poměrem 24:25. Chromatický půltón např. es–e je tedy menší (24:25) než diatonický např. e–f (15:16). Proto nelze v přirozeném ladění konstruovat nástroje

s pevným laděním. Např. klávesové nástroje by musely mít složitou dvojitou klaviaturu.

42. **Pythagorejské ladění.** Ve starověku a středověku byly tónové soustavy stavěny převážně podle *melodického principu*. Tyto soustavy byly odvozovány ze dvou základních intervalů, kvinty (ev. kvarty) a oktávy. Protože interval kvinty byl rozhodující, bývá tento druh ladění označován jako *kvintové ladění*. Častěji však bývá nazýváno laděním pythagorejským, neboť Pythagoras (Pythagoras ze Samu, nar. mezi r. 580–570) škola a její následovníci v průběhu staletí vybudovali podobnou teorii systému kvintového ladění. Pythagoras došel k základním intervalům pokusy s dělením struny. Pro získání oktávy strunu rozpůlil, rozdělil ji v poměru 1:2, kvintu získal poměrem 2:3 a kvartu 3:4. Ke stanovení celého tónu použil dvou kvintových postupů, od nichž odečetl oktávu (c–g–d¹ minus d–d¹ = c–d). Půltónů užíval dvou. Prvý půltón nazval *limma*. Druhou hodnotu půltónu získal ze sedmi vzestupných kvint, od nichž odečetl čtyři oktávy – tento půltón nazval *apotomé*. V důsledku tohoto způsobu ladění, založeného na absolutně čistých kvintách a oktávách, nebyly chromatické půltóny (např. c–cis) stejné jako půltóny diatonické (c–des). Další nesnázi bylo, že dvanáctá vzestupná kvinta (A₂–E₁–H₁–Fis–cis–gis–dis¹–ais¹–eis²–his²–fisis³–cisis⁴–gisis⁴) se nekryla – jak by měla – se sedmou vzestupnou oktávou (A₂–A₁–A–a–a¹–a²–a³–a⁴). Tento rozdíl – A₂–gisis⁴ minus A₂–a⁴ – který vznikne mezi dvanáctou kvintou a sedmou oktávou se nazývá *pythagorejské komma* a rovná se 23,5 centu. Je velmi slyšet a vadí zejména při hře týchž tónů, vzdálených od sebe několik oktáv. Intervalové poměry durové stupnice v pythagorejském ladění:

stupeň	interval k základnímu tónu
prima	1:1
sekunda	9:8
tercie	81:64
kvarta	4:3
kvinta	3:2
sexta	27:16
septima	243:128
oktáva	2:1

43. Temperované ladění. Snaha o využití všech dvanácti, s molovými čtyřadvaceti, možných tónin vedla k vytvoření nového principu ladění. Po nejrůznějších pokusech se jako nejpraktičtější ustálilo tzv. *rovnoměrně temperované dvanáctistupňové ladění*, které navrhl v roce 1691 německý varhaník *Andreas Werckmeister* (1645–1706). Přirozená a pythagorejská soustava nemají totiž žádný interval, jehož násobek by tvořil oktávu. Proto bylo třeba k vyplnění oktávy dvou různých půltónů – diatonického a chromatického. Soustava rovnoměrně temperovaná rozděluje oktávu na dvanáct stejných půltónů. Temperovaný půltón je dán poměrem 1 : dvanáctá odmocnina ze dvou. Také zde se vychází z kvint, avšak z kvint temperovaných, tj. zmenšených o 1/12 kommatu. Pythagorejské komma se tak rozdělovalo rovnoměrně mezi všech dvanáct kvint. Temperované ladění tedy počítá s nedokonalostí lidského ucha, které rozezná rozladění tónu až v jistém rozmezí, které nazýváme *intonanční rozkvyv*. Jeho velikost je individuální. V temperovaném ladění jsou všechny intervaly kromě oktáv nepatrně falešné. Vzhledem k tomu, že jedna dvanáctina kommatu je pouze 1/51 temperovaného půltónu, nelze toto rozladění uchem prakticky postřehnout. Tyto odchylky v ladění se však projeví, jestliže se při hře použijí některé flažolety u chordofonů nebo přirozené tóny u nátrubkových nástrojů.

Literatura:

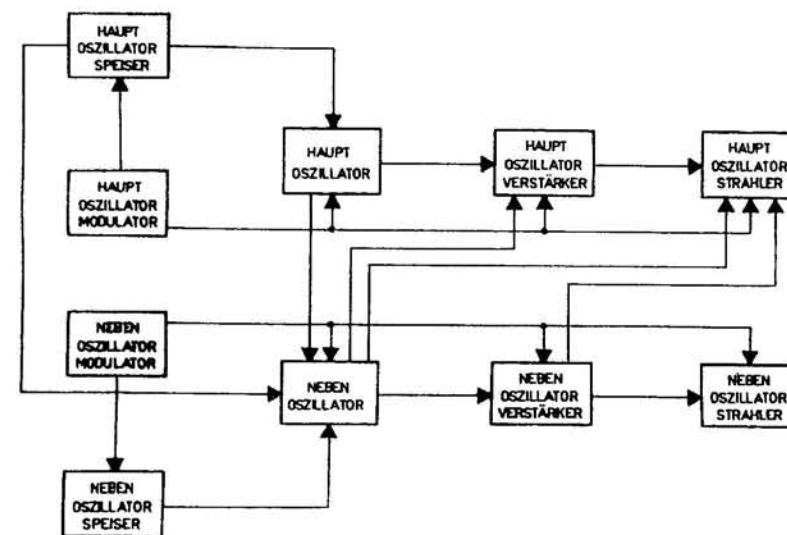
Špelda, Antonín: Hudební akustika. Praha 1978.

2. HUDEBNÍ NÁSTROJE JAKO AKUSTICKÉ ZDROJE

Počátky organologie můžeme sledovat již od antického starověku. Tehdy se daly základní akusticko-fyzikální výzkumy a experimenty na nejjednodušších hudebních nástrojích (monochord, píšťala, zvon). Pythagoras, Aristoteles, Euklides a další vyjádřili matematicky základní poznatky o šíření zvuku v prostoru a v pevných tělesech, objevili uzly a kmitny na struně a řadu dalších zákonitostí. Tím byly položeny společné základy akustice a organologie. Postupem doby akustika stále více ovlivňovala vývoj hudebních nástrojů a její pomocí mohly být neustále zpřesňovány i poznatky o nich. Vzájemné ovlivňování akustiky a organologie vyvrcholilo v dnešní době, kdy prudký rozvoj měřicí techniky se podílel podstatnou měrou na výzkumu hudebních nástrojů. Výsledky akustických výzkumů jsou zcela objektivní a slouží nejen poznání historických hudebních nástrojů, ale především při vývoji a zlepšování nástrojů současných.

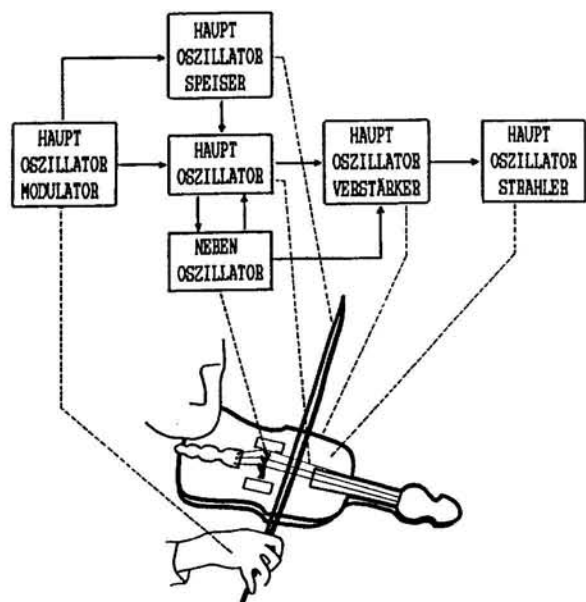
Z velkého množství klasifikačních kritérií hudebních nástrojů je jedno z nejdůležitějších to, které vyplývá z pohledu na ně jako na akustické zdroje. Prozatím však tento zřetel nebyl v žádné z dosavadních systematick hudebních nástrojů uplatněn naprosto důsledně. Pokud se s ním v některých systematickách přece jenom setkáme (například v systematicce hudebních nástrojů od Hornbostela a Sachse), tak již dávno nevyhovují současným poznatkům a požadavkům akustiky. Aby byly jednotlivé nástroje z tohoto hlediska mezi sebou srovnatelné, je třeba je rozložit na primární, funkčně již dále nedělitelné elementy a jejich vzájemné vazby. Základní funkční elementy s příslušnými vzájemnými vazbami jsou společné pro všechny hudební nástroje, i když žádný z nich je neobsahuje všechny a i když se u jednotlivých nástrojů vyskytují v různých formách, v různých typech. Rovněž počet stejných prvků může být u různých hudebních nástrojů různý.

Zjišťování existence těchto základních prvků, jejich forem a vzájemných vazeb je možné pouze pomocí objektivních akustických měření, která jsou při analýzách hudebních nástrojů naprosto nezbytná. Tyto metody však vyžadují vybudování specializovaných pracovišť s parkem měřicích přístrojů.



Obr.2 Obecný model hudebního nástroje.

Jako základ pro analýzy hudebních nástrojů jsem vypracoval schéma (obecný model) hudebního nástroje, který obsahuje všechny základní funkční elementy a všechny možné jim příslušející spoje – vazby. Základní elementy a jejich vazby jsou u modelu v nekonkrétních podobách. Prvky jsou nazvány podle své funkce a vazby jsou bez názvů, neboť jejich existence vyplyne až při určování konkrétních podob některých prvků. Každý prvek a vazba jsou v modelu obsaženy jen jedenkrát. Vlastní analýza hudebního nástroje spočívá v tom, že měřeními zjišťujeme, které z prvků modelu nástroj obsahuje, jak jsou v něm tyto prvky navzájem pospojovány, jak jimi postupuje signál (určení akustické cesty) a v jakém množství a jaké formě se v hudebním nástroji vyskytují. Model je zde velmi dobrou pomůckou, protože v nejasných případech jeho prvky u zkoumaných nástrojů raději předpokládáme a měřeními dokazujeme jejich eventuální neexistenci. Ještě ve zvýšené míře to platí při zjišťování vazeb, což je vždy obtížnější než zjišťování prvků. K nástroji tedy přistupujeme jako k modelu, z něhož prvky a vazby „vybíráme“.



Obr.3 Použití obecného modelu hudebního nástroje na příkladu jihlavských skřípek.

Pro názvy jednotlivých prvků modelu jsem použil terminologie běžné pro základní obvody elektrotechnických zapojení. Je to možné, protože hudební nástroj je v podstatě vysílačem signálu (podobně jako například rozhlasové vysíláče). Tato terminologie vyhovuje navíc jednoznačností a srozumitelností.

Přehled forem typických základních prvků a vazeb u hudebních nástrojů:

A) Hlavní oscilátor:

- rtý,
- plátek jednoduchý,
- plátek dvojitý,
- hrana pevná,
- hrana rotující,
- list,
- hlasivky,
- struna,
- blána,
- talíř,
- tyč volná,
- tyč vetknutá,
- deska volná,
- deska vetknutá,
- zvon,
- koule dutá,
- koule plná

B) Napáječ hlavního oscilátoru:

- vzduch,
- plektrum,
- prst,
- smyčec,
- palička,
- kámen,
- pružina,
- silový impuls

C) Zesilovač hlavního

- OSZILLATOR:*
- vlastní dutina,
 - vnější dutina,
 - deska,
 - blána,
 - struna,
 - tyč

D) Změna frekvence hlavního oscilátoru:

- přeladěním skokem,
- přeladěním plynule,
- přeladěním dutiny skokem,
- výměnou pevně laděných osc.,
- změnou napětí napáječe

E) Modulace:

- amplitudová,
- frekvenční,
- superpozicí kmitů z jiného oscilátoru

F) Modulováno do:

- hlavního oscilátoru
- zesilovače hlav.oscilátoru,
- vedlejšího oscilátoru,

zesilovače vedl.oscilátoru,
vyzařovače hlav.oscilátoru,
vyzařovače vedl.oscilátoru,
napáječe hlav.oscilátoru,
napáječe vedl.oscilátoru

blána,
struna,
tyč,
zesilovač hlav.osc.

G) Hlavní osc. převážně:
základní,
harmonický,
spektrální

H) Kmity hlav. oscilátoru:
tlumené,
relativně netlumené

I) Počet hlav. oscilátorů:
jeden,
více

J) Možný počet hlav. oscilátorů
v současném provozu:
jeden,
více

K) Vedlejší oscilátor:
rty,
plátek jednoduchý,
plátek dvojitý,
hrana pevná,
hrana rotující,
list,
hlasivky,
struna,
blána,
talíř,
tyč volná,
tyč vetknutá,
deska volná,
deska vetknutá,
zvon,
koule dutá,
koule plná

L) Napáječ vedlejšího osc.:
prst,
plektrum,
vzduch,
smyčec,
palička,
kámen,
pružina,
silový impuls,
hlavní oscilátor,
napáječ hlav.oscilátoru,
vyzařovač hlav.oscilátoru

O) Kmity vedl. oscilátoru:
tlumené,
relativně netlumené

P) Počet vedlejších oscilátorů:
jeden,
více

Q) Možný počet vedl. osc. v sou-
časném provozu:
jeden,
více

R) Vyzařovač hlavního oscilátoru
převážně:
plocha,
otvor,
samotný vedl.oscilátor
vyzařovač hlavního oscilátoru

S) Vyzařovač vedl. oscil. převážně:
plocha,
otvor,
samotný oscilátor

T) Změna frekvence vedl.oscil.:
přeladěním skokem,
přeladěním plynule,
přeladěním dutiny skokem,
přeladěním dutiny plynule,
výměnou pevně laděných oscil.,
výměnou pevně laděných dutin,
změnou napětí napáječe vedl.osc.
v závislosti na hlav.oscilátoru

M) Zesilovač vedl. osc.:
vlastní dutina,
vnější dutina,
deska,

N) Vedlejší osc. převážně:
základní,
harmonický,
spektrální

Hlavní oscilátor je ta část hudebního nástroje, na které nebo ve které vznikají kmity zvuku produkovaného nástrojem. Je zřejmé, že hlavní oscilátor je tedy základním a nezbytným prvkem každého hudebního nástroje. Typ – forma hlavního oscilátoru je potom základním určujícím prvkem nástroje. Řada současných systematik hudebních nástrojů vychází právě z určování forem hlavního oscilátoru jako jediného třídícího prvku. Podmínkou pro vznik a eventuální udržování nebo obnovování kmitů v hlavním oscilátoru je existence *napáječe*, prvku, který dodává oscilátoru potřebnou energii. Je-li například oscilátorem struna, pak napáječem může být smyčec, plektrum, prst nebo v ojedinělých případech i vzduch. *Horn-nostel–Sachsova* systematika hudebních nástrojů třídí nástroje částečně podle typu hlavního oscilátoru a částečně podle typu napáječe, přičemž obě kritéria střídá a klade je na stejnou úroveň, připisuje jim stejný vý-

znam. Například aerofony jsou v této systematice určeny napáječem, chordefony hlavním oscilátorem. Jde však o funkčně zcela odlišné prvky, které nelze ztotožňovat a nelze jim přisuzovat stejnou funkci. Je tedy z hlediska vzniku zvuku v hudebním nástroji toto třídění nedůsledné. Jak hlavní oscilátor, tak i jeho napáječ jsou nezbytnými prvky každého hudebního nástroje. Některé jednoduché nástroje se skládají jen z těchto dvou prvků – z hlavního oscilátoru a z napáječe. Mezi nimi je vždy přímá a jediná vazba směrem z napáječe k oscilátoru.

Většina hudebních nástrojů má však ještě další funkční prvky. Je to především zesilovač. Jednoduše řečeno, je to ta část nástroje, ve které nebo pomocí které se kmity vytvořené v hlavním oscilátoru zesilují – stávají se hlasitější. Jsou to například rezonanční dutiny, souznějící struny, rezonanční desky apod. Na zesilovač většinou pak je navázán vyzařovač, jehož prostřednictvím je převážná část produkovaného zvuku předávána vnějšímu prostředí. Nemá-li nástroj vyzařovač, přebírá většinou jeho funkci zesilovač. U jednoduchého hudebního nástroje, který se skládá jen z hlavního oscilátoru a napáječe, má současně funkci vyzařovače také hlavní oscilátor.

Řada hudebních nástrojů je schopna změny frekvence výsledného tónu. Děje se tak přeladováním hlavního oscilátoru, přeladováním některých typů zesilovače, jejich výměnou atd. Rozlišujeme rovněž schopnosti *modulování* jednotlivých tónů. Jsou to rychlé a malé změny jejich úrovně (amplitudy), frekvence nebo současné změny obojího. Zvláštní případ modulace je superponování kmitů z dalšího, vedlejšího oscilátoru na kmity oscilátoru hlavního. Tento typ modulace je častý u nástrojů středověkého hudebního instrumentáře, ale také u některých současných nástrojů pro lidovou hudbu. Důležité je zjištění, ve kterém základním prvku hudebního nástroje modulace vzniká. Nemusí to být jen v napáječi nebo v hlavním oscilátoru. U některých nástrojů se tak děje až v zesilovači nebo dokonce ve vyzařovači. Většina hlavních oscilátorů u hudebních nástrojů pracuje na té frekvenci, na kterou je naladěna. Tyto oscilátory pracují na frekvenci základní. Některé však pracují občas nebo výhradně na frekvenci harmonické, jiné produkují celé spektrum kmitočtů o přibližně stejné amplitudě. Tyto spektrální oscilátory nemají definovanou výšku tónu a vyskytují se nejčastěji u nástrojů rytmických.

Hlavní oscilátory některých hudebních nástrojů produkují jen tlumené kmity. Typickým příkladem je struna, rozezvučovaná – napájena prstem nebo plektem. Kmity relativně netlumené vznikají tehdy, je-li napáječ schopen udržovat kmity hlavního oscilátoru jistou dobu o neměnné ampli-

tudě. Příkladem budiž opět struna, tentokrát však napájena delší dobu. Typem takového napáječe je smyčec. U hudebních nástrojů dále zjišťujeme kolik obsahují hlavních oscilátorů a kolik jich může být současně v provozu.

Dalším, často opomíjeným prvkem hudebních nástrojů je vedlejší oscilátor. Jeho existence je v některých případech velmi zřetelná, jako například u nástrojů s bordunovými strunami, často však mívá méně výrazné podoby (vznik vedlejšího oscilátoru je často náhodný). Ale ani o „skrytých“ vedlejších oscilátorech nelze říci, že jejich funkce je podružná. Vedlejší oscilátor vždy velmi podstatně ovlivňuje výsledný zvukový produkt hudebního nástroje. Při analýze hudebních nástrojů proto musíme existenci vedlejšího oscilátoru vždy předpokládat a teprve měřením dokázat jeho eventuální absenci. Jako názorný příklad hudebního nástroje se „skrytými“ vedlejšími oscilátory slouží jihlavské skřípky. Kobylka skřípek podepírá každou strunu zvlášť samostatným zubem. Na horní plošce každého zubu je poměrně hluboký zářez, který nedovoluje sesmeknutí struny. Struna skřípek potom při svém pohybu v rovině paralelní se základní rovinou nástroje, ke kterému je nucena smyčcem, vyklání ze základní polohy i zub kobylky. Amplituda pohybu zubu je přímo úměrná amplitudě kmitů struny a mechanické pružnosti materiálu kobylky a nepřímo úměrná objemové hmotnosti struny. Zub se tak projevuje jako nepevné uchycení struny, částečně sleduje její kmity a tím tlumí jejich amplitudu. Subjektivní vjem při těchto poměrech je podobný jako při hře na housle s dusítkem. Tyto vztahy však platí jen pro nejnižší laděné struny a jen po jistou kmitočtovou hranici. Tato hranice je dána rezonančním kmitočtem hmoty zubu kobylky a její akustickou pružností. Zub je totiž schopen sledovat kmity struny jen po svůj vlastní rezonanční kmitočet. Čím je větší hmota zubu kobylky, tím je nižší kmitočet vlastní rezonance. Ze zvukově estetických důvodů je žádoucí, aby tato frekvence byla co nejnižší, aby se dusítkový efekt projevoval na co nejmenší části frekvenční charakteristiky nástroje. Kobylky skřípek jsou proto robustní s velmi dlouhými zuby, což snižuje jejich vlastní rezonanční kmitočet na co nejnižší mez. Dosud popisované chování kobylky se jeví jako konstrukční nedokonalost, která byla výrobci s větším či menším úspěchem potlačována. Avšak u dalších frekvencí, počínajíc rezonančním kmitočtem zubu, se poměry mezi kmitající strunou a kobylkou mění. Změna na rezonančním kmitočtu zubu se děje skokem. Pokud je struna naladěna na tuto frekvenci, tak vůbec „nezní“, vydává tón relativně velmi slabý. Její tlumení je, vzhledem k největšímu rozkmitu zubu, největší. Od této frekvence směrem k vyšším kmitočtům se stává

účinek kobylky pro výsledný zvuk skřípek žádoucí. Struna se totiž stává napáječem mechanického rezonátoru zubu, který osciluje pak trvale na kmitočtu své vlastní rezonance. Struna skřípek pak zastává dvojí funkci. Je hlavním oscilátorem nástroje a současně napáječem vedlejšího oscilátoru – zubu kobylky. Amplituda kmitání zubu se mění se změnou frekvence struny, kmitočet zubu však zůstává konstantní. Tento kmitočet se svými harmonickými a subharmonickými složkami se skládá se základními a vedlejšími kmitočty struny, takže vzniká řada nových součtových a rozdílových frekvencí, z nichž vždy některé, i když s různou intenzitou, se nacházejí ve slyšitelném zvukovém spektru. Díky vedlejšímu oscilátoru má pak výsledný zvuk skřípek jemně bzučivý, nazálně metalický charakter.

Vedlejší oscilátor se může vyskytovat ve stejných formách jako oscilátor hlavní. Musí mít rovněž napáječ, který však bývá často společný pro oba oscilátory. Někdy přebírá funkci napáječe vedlejšího oscilátoru oscilátor hlavní, tak jako u uvedeného případu. Také ostatní prvky příslušející k vedlejšímu oscilátoru jsou obdobné jako u oscilátoru hlavního, jak vyplývá ze schématu modelu hudebního nástroje, jde vlastně o dva (nebo více) paralelní nástroje, které mohou existovat buď v této úplné podobě nebo mohou vzájemně využívat některých společných prvků, eventuálně vazeb. Při analýze hudebního nástroje je tedy také důležité zjišťování vzájemného prolínání obou eventuálních paralelních nástrojů. U vedlejšího oscilátoru, tak jako u hlavního, zjišťujeme možnosti modulace, změny frekvence, počet oscilátorů atd.

Při analýze hudebního nástroje se zubatou kobylkou jsem vypracoval schéma, vycházející z uvedeného modelu obecného hudebního nástroje. Schéma obsahuje jeden napáječ představovaný smyčcem, který udržuje v relativně netlumeném kmitání tři nebo čtyři (podle počtu strun) hlavní oscilátory. Kmity hlavních oscilátorů jsou vyzařovány do prostoru jednak přímo a jednak jsou prostřednictvím kobylky přenášeny do neladěné rezonanční dutiny – zesilovače – a jeho částí; vrchní deskou nástroje (víkem) jsou pak také vyzařovány do prostoru. Spodní deska se vzhledem ke značné tloušťce (obvyklé u nástrojů tohoto typu) uplatňuje jako vyzařovač jen při minimálním počtu nejnižších frekvencí. Zvukové výřezy ve víku se ve funkci vyzařovače uplatňují rovněž jen nepatrně. Jak jsem již uvedl, obsahuje schéma takového nástroje tři nebo čtyři vedlejší oscilátory – zuby kobylky. Kmity vedlejších oscilátorů se jednak superponují na kmity oscilátorů hlavních a jednak se směšují s dalšími produkty hlavních oscilátorů. Proces směšování se děje ponejvíce v zesilovači nástroje. Výsledný signál je potom vyzařován víkem nástroje. Při vlastní hře se uplatňuje ještě jeden

prvek – modulátor hlavního oscilátoru, který je představován samotným hráčem, resp. jeho rukama. Pravá ruka ovládající smyčec může jeho různým tlakem na strunu měnit dynamiku hry – amplitudově modulovat hlavní oscilátory. Levá ruka, která především určuje frekvence hlavních oscilátorů, může také vibratem jemně frekvenčně modulovat hlavní oscilátory. Vzhledem k technice a způsobu hry na tyto nástroje jsou vazby *modulátor – napáječ a modulátor – hlavní oscilátor* jen velmi malé a volné a při hře většiny muzikantů je nelze vůbec zaznamenat.

Jako příklad laboratorního měření na hudebním nástroji se zubatou kobylkou uvedu zjišťování existence vedlejšího oscilátoru a měření jeho produktů: Na vybraný exemplář jihlavských skřípek byla natažena jediná ocelová struna o průměru 0,32 mm (běžně užívaná jihlavskými skřípkaři) a vedena přes levý krajní zub kobylky, příslušející struně *e*. Bylo nutné zvolit správný způsob pro snímání kmitů zubu kobylky a také pro rozeznávání struny. Při běžných laboratorních měřeních smyčcových hudebních nástrojů se pro rozkmitání struny většinou používá mechanického nekonečného smyčce *F.Herolda*, který však byl v době měření nedostupný a jehož čistě mechanický princip nemusí vždy splňovat přísné požadavky objektivního laboratorního měření. Heroldův nekonečný smyčec byl původně zkonstruován pro tzv. vyhrávání houslí a viol. Pro rozkmitání struny jsem použil elektromagnetického budiče vlastní konstrukce (při těchto měřeních je většinou nutné experimentovat a improvizovat), který umožňuje přesnou kontrolu všech jeho funkcí po převedení na elektrické veličiny. Další předností elektromagnetického budiče vůči nekonečnému smyčci *F.Herolda* je, že není v mechanickém styku s rozkmitávanou strunou (struna je rozkmitávána proměnným elektromagnetickým polem), což vždy do měření vnáší řadu nepřesností a chyb. Celá budicí jednotka se skládala z výkonového tónového generátoru (150 W/600 Ů), jehož produkt byl kontrolován paralelně připojeným osciloskopem (kontrola průběhu – tvaru budicích kmitů) a čítačem (kontrola výstupního kmitočtu). Budicí element byl umístěn v místech, kde je struna při hře rozeznívána smyčcem. Výstup výkonového generátoru byl přiveden do laditelné pásmové propusti, velmi strmé, která zaručovala, že se na výstupní frekvenci generátoru nebudou superponovat cizí rušivé frekvence. Pásmová propust byla přeladována synchronně s generátorem. Aby se bezpečně z měření vyloučila rušivá frekvence 50 Hz ze silového rozvodu, byl výstup z pásmové propusti přiveden ještě na frekvenční zádrž 50 Hz. Signál byl dále přiveden do výkonového širokopásmového zesilovače, na jehož výstup byl připojen elektromagnetický budič struny.

Elektromagnetický budič byl umístěn do těsné blízkosti rozkmitávané struny v místě smyku smyčce. Struna byla přeladována pomocí mechanického zařízení (capotasto). Současně se změnou frekvence struny byl přeladován i výkonový generátor spolu s pásmovou propustí tak, aby struna měla maximální amplitudu rozkmitu. K indikaci a kontrole tohoto způsobu ladění generátoru byla využita snímací jednotka skládající se z elektromagnetického snímače, jehož výstupní napětí bylo registrováno voltmetrem. Během měření bylo neustále kontrolováno, zdali se nezměnila frekvence generátoru vůči naladění struny.

Vyřešit zařízení – snímací jednotku – pro měření kmitů zubu kobylky byl problém daleko nesnadnější, protože amplitudy zubu jsou velmi malé a jakékoliv přídavné zařízení tyto kmity ještě ztlumí. Proto bylo upuštěno od všech snímačů dotkových (piezoelektrických a miniaturních geofonů). Nepoužil jsem také snímače kapacitního, protože i když snímá kmity bezdotykově, musí se na zub kobylky nalepit proužek kovové fólie (který by sloužil jako střední deska snímacího „motýlkového“ kapacitního kondenzátoru), která ovšem také částečně ztlumuje jeho kmity. Kapacitní snímání chvění klade navíc velké požadavky na mechanickou stabilitu nástroje vůči snímací jednotce, což nebylo možné v dostatečné míře zajistit.

Nakonec jsem se rozhodl pro snímání pomocí modulace světelného paprsku clonou, kterou představoval samotný zub kobylky. Jde o podobný princip jako u snímání kdysi používané optické zvukové stopy filmu. Celá snímací jednotka se skládala z mosazné trubky o délce 100 mm a světlosti 20 mm. Na obou koncích byla trubka zaslepena a její vnitřní stěna byla natřena černým matovým lakem, který sloužil jako ochrana proti nežádoucím světelným reflexům. Ve středu trubky byl zářez o 0,2 mm širší než byla tloušťka zubu kobylky. V jednom konci dutiny trubky byla umístěna miniaturní žárovka se soustavou clon, které zajišťovaly poměrně úzký svazek světelných paprsků. Výhodnější by bylo použít nízkovýkonový laser, ale ten nebyl v té době k dispozici. Na opačném konci dutiny trubky byla umístěna „rychlá“ fotodiody, jejíž světlocitlivá část byla přesně situována do osy úzkého kužele světelných paprsků. Celá snímací jednotka byla zafixována na víku nástroje tak, aby kmitající zub kobylky zasahoval částečně do světelného toku žárovky a aby svým chvěním působil jako proměnlivá clona.

Žárovka ve snímací jednotce byla napájena ze stejnosměrného zdroje napětí, dokonale stabilizovaného a filtrovaného. Zejména důkladně musely být odfiltrovány rušivé frekvence 50 Hz a 100 Hz, pocházející ze střídavého síťového rozvodu 220 V. Výstup z fotodiody, jehož napětí se měnilo

souhlasně s kmitáním zubu kobylky, byl přiveden do napěťového zesilovače, protože výstupní napětí fotodiody bylo velmi malé. Na výstup zesilovače byly připojeny vyhodnocovací přístroje přes dolnofrekvenční propust, která zabraňovala měření zkreslujících údajů, vzniklých kmitáním struny. Pomocí osciloskopu byl sledován průběh kmitů zubu kobylky a čítačem jejich kmitočty.

Vyhodnocením naměřených údajů byla prokázána existence vedlejšího oscilátoru a jeho funkce, jak již bylo popsáno.

Literatura:

- Dräger, H.H.: Prinzip einer Systematik der Musikinstrumente. In: Musikwissenschaftliche Arbeiten III, 1948.
- Hornbostel, E.M. – Sachs, C.: Systematik der Musikinstrumente. In: Zeitschrift für Ethnologie, 1914.
- Hutter, J.: Hudební nástroje. Praha 1945.
- Kurfürst, P.: Musikinstrumente und Schallgeräte als akustische Quellen. In: Česopis Moravského muzea v Brně. 1974, s.255–265.
- Leng, L.: Slovenské ľudové hudobné nástroje. Bratislava 1967.
- Sachs, C.: Handbuch der Musikinstrumentenkunde. Leipzig 1920.
- Špelda, A.: Úvod do akustiky pro hudebníky. Praha 1958.
- Reinhard, K.: Beiträge zu einer neuen Systematik der Musikinstrumente. In: Die Musikforschung, 1960.
- Zamazal, V.: Hudební nástroje před mikrofonom. In: Technické informace č.17. Vydal Čs. rozhlas Praha. 1966.

3. VLČÍ TÓN

Vlčí tón (vlk) odedávna pronásleduje výrobce i uživatele především smyčcových nástrojů. Jde o jeden nebo i více tónů, které nelze na některých nástrojích zahrát ve stejné zvukové kvalitě jako tóny ostatní. Projevuje se to hučením a přeskokováním tónu v rychlých intervalech do vyšších harmonických. Tón se jeví jako „hluchý“. U houslí bývá vlk pozorovatelný v oblasti od g^1 do g^2 , nejčastěji se však projevuje u violoncella, a to zvláště ve vyšší poloze na struně G. Hudební nástroje s vlkem ztrácejí na ceně a mnohdy jsou dokonce neprodejně. Tento jev byl a je pro většinu houslařů a houslistů nevysvětlitelný. Proto vždy byla jeho existence provázána řadou dohadů, pověr a experimentů. Pokusů o likvidaci vlka se ujali mnozí amatérští vynálezci i profesionální houslaři, kteří často inzerovali své dílčí úspěchy a nabízeli muzikantům jeho odstranění. Dodnes se

můžeme setkat s řadou „odvlkovačů“, z nichž jen některé a jen v některých případech dovedou výskyt vlčího tónu eliminovat. Jejich částečná úspěšnost v odstraňování tohoto jevu je dána tím, že vlčí tón nevzniká vždy za stejných podmínek.

Vlčí tón vzniká nejčastěji tehdy, je-li rezonanční skříňka zhotovena z nekvalitního materiálu nebo má nedokonalou konstrukci. Pak se stává, že amplituda rezonanční frekvence korpusu (nebo častěji jeho části – většinou příliš tenké desky) je při základním tónu tak veliká, že tlaková síla působící na smyčec nestačí udržet strunu v mohutném chvění způsobeném rezonančním efektem a tón přechází ve svou svrchní oktávu. Základnímu tónu tak ovšem přestala být dodávána energie a ten mizí. Když se zeslabí natolik, že smyčec opět stačí základnímu tónu energii dodávat, děj se opakuje a tón neustále kolísá jak v barvě tak i v intenzitě. Proti tomuto typu vlka je jediná možná obrana, spočívající v zesílení příliš tenkých desek nebo jejich částí přiklizením smrkových nebo javorových „podložek“. Někdy pomůže i výměna basového trámce za trámec jiných rozměrů nebo nepatrná změna jeho umístění tak, aby se změnila vlastní rezonance korpusu či jeho částí. Vlčí efekt vzniká i tehdy, jestliže část některé struny mezi struníkem a kobylkou velmi výrazně kmitá na harmonické frekvenci některého základního tónu. Oscilátor základního tónu je pak „strháván“ vedlejším oscilátorem krátké části struny. Zde pomohou „odvlkovače“ ve formě kovového závažíčka navlečeného na tuto část struny a zafixovaného. Jeho použitím se podstatně změní vlastní frekvence této části struny. Jde především o známé mosazné „odvlkovače“ pro violoncella, které jsou často opředeny řadou mýtických představ, ale i reklam, o tajném a tajemném složení onoho zázračného kovu, který dovede odstranit vlčí tón. Tomu také odpovídá vysoká cena, za níž bývá toto obyčejné mosazné závažíčko prodáváno.

Nejnověji Jan M. Firth a Michael Buchanan (*The wolf in the cello*. JASA 53, 1973, 2, 457–463) zjistili, že při vlku se základní tón struny violoncella štěpí na dvojici kmitů, jejichž frekvenční vzdálenost se rovná frekvenci drsnosti (kolísání) vlčího tónu. Někdy dochází ke štěpení ve dvojici i u vyšších harmonických tónů. Autoři přirovnávají tyto rozštěpené kmitočty k frekvencím, vznikajícím ze dvou spřažených elektrických kmitavých obvodů.

Literatura:

Špelda, Antonín: Hudební akustika. Praha 1978, s.145.

4. STOPOVÁ MÍRA

Stopová míra (něm. Fusstonmass) je míra, podle níž se určuje délka varhanních píšťal. Někdy se také stopovou mírou označují smyčcové chordofony (kontrabasy a basety) atd. Ty však nejsou označovány podle délky strun, ale podle jejich ladění, vzhledem k varhanním píšťálám, ve stopových délkách.

Stopa je snad nejstarší délkovou mírou. V průběhu staletí se poněkud měnila, ale nikdy ne příliš, protože byla odvozena od délky chodidla lidské nohy. Od ní pak byly odvozovány míry další, menší či větší. Již ve druhém tisíciletí před naším letopočtem používali Sumerové stopu o délce 26,45 cm. V antickém Řecku se nazývala *pús* a měřila 29,6 cm. Stejně tak ve starém Římě, kde se nazývala *pes*. Na počátku 17. století měřila česká stopa 29,47 cm. Stavitelé varhan používali hlavně stopu vídeňskou (dolnorakouskou) o délce 31,6 cm. Dnes se při výrobě varhanních píšťal užívá především stopy anglické, která měří 30,5 cm. Pokusy zavést ve varhanářství namísto stopové míry míru metrickou, vždy narazily na odpor a ztroskotaly. Překážkou byla nejen tradice, ale i různé přípravky, které byly vyráběny vždy ve stopových mírách.

Výška varhanního tónu odpovídá délce píšťaly. Čím kratší je píšťala, tím vyšší je tón. Oktávové polohy hlasů se určují podle délky otevřené varhanní píšťaly C, která měří 8 stop (8°). U krytých píšťal jsou samozřejmě délkové parametry v poloviční velikosti. Hlubší oktávy jsou označovány jako 16° (=C₁) a 32° (=C₂). Píšťaly vyšších oktáv jsou vždy o polovinu kratší – 4° = c, 2° = c¹, 1° = c² atd. Toto délkové značení se vztahuje na nejhlubší píšťalu určitého hlasu v příslušné oktávě.

Praktické délky varhanních píšťal:

Principál	–	2	=	5/8 m
	–	4	=	5/4 m
	–	8	=	5/2 m
	–	16	=	5 m
	–	32	=	10 m
Kvinta	–	2/3	=	5/24 m
	–	1 1/3	=	5/12 m
	–	2 2/3	=	5/6 m
	–	5 1/3	=	5/3 m
	–	10 2/3	=	10/3 m

Tercie	–	$\frac{4}{5}$	=	1/4 m
	–	$\frac{13}{5}$	=	1/2 m
	–	$\frac{31}{5}$	=	1 m
	–	$\frac{62}{5}$	=	2 m

5. FREKVENČNÍ NORMÁL – KOMORNÍ A¹

Frekvenční normál – a¹, komorní a, komorní tón. Hudební nástroje se ladí podle frekvenčního normálu, který byl čas od času stanovován mezinárodními úmluvami. Vývoj frekvenčního normálu má sestupně vzestupnou tendenci, což má dnes velký význam pro tzv. autentické provádění dobových skladeb:

- v 16. a 17. století se v různých městech a různých státech používalo různých frekvenčních normálů pro ladění hudebních nástrojů. Nazývaly se buď „Chorton“ pro ladění varhan a chórových pěveckých sborů, nebo „Kornetton“ pro ladění městských pištců a trubačů.
 - v Paříži kolem roku 1680 bylo používáno ladění 404 Hz.
 - V Petersburgu se kolem roku 1771 ladilo a¹ na frekvenci 417 Hz.
 - z Paříže známe ladění orchestru Velké opery z roku 1774 410 Hz.
 - v roce 1778 se v Německu pohybovala frekvence a¹ kolem 395 Hz a níže.
 - v roce 1778 bylo tzv. pařížskou konvencí dohodnuto, že a¹ = 409 Hz.
 - avšak ještě v roce 1820 se v Itálii používalo normálu 424,17 Hz,
 - v roce 1821 se ladilo v Paříži na 431,34 Hz,
 - a v roce 1852 rovněž v Paříži na 449 Hz.
 - v Petersburgu v roce 1857 na 460 Hz.
 - v roce 1858 stanovila pařížská komise, že a¹ = 435 Hz.
 - v roce 1885 přijala Mezinárodní konference ve Vídni normál 435 Hz jako obecně platný. Přesto však byly v dalších letech konstruovány hudební nástroje s neproměnnými tónovými výškami, kde tón a¹ měl vyšší frekvenci než doporučený normál 435 Hz.
 - v roce 1939 proto stanovila Mezinárodní komise pro normy ISA (International Standard Association) v Londýně novou frekvenci pro a¹ – 440 Hz.
 - v roce 1953 londýnská konference ISO (International Organization for Standardization) znovu potvrdila frekvenční normál 440 Hz.
- Dnes je frekvenční normál 440 Hz obecně přijat. Jeho předmostí je, že kmitočty tónů c jsou ve všech oktávách, až na subkontra C s frekvencí 16,5 Hz, vyjádřeny celými čísly.

Kromě pařížského ladění z roku 1885 se od roku 1900 prosazuje tzv. vídeňské ladění (vysoké ladění) pro dechovky. Ve snaze o břešknější, jasnější a průraznější zvuk začali především vídeňští nástrojaři po dohodě s „dechovkáři“ vyrábět žesťové nástroje s laděním a¹ = 460,85 Hz, které je u dechovek používáno dodnes. V současné době nabízejí nástrojařské firmy žesťové i dřevěné dechové nástroje ve dvojitým ladění: nízkém – 440 Hz a vysokém 460,85 Hz.

Mezinárodní ladění jsou všechny druhy ladění (pythagorejské, přirozené, temperované) které vycházejí z frekvenčního normálu a¹ = 440 Hz.

Fyzikální ladění je ladění, u něhož se za frekvenční normál nevolí tón a¹ (440 Hz), ale tón subkontra C s kmitočtem 16 Hz. Tón a¹ je potom tónem odvozeným ze základního tónu C₂ a jeho kmitočet je 430,5 Hz. Fyzikální ladění je ladění temperované, hodnoty intervalů se měří buď v temperovaných půltónech nebo v centech. Výhodou fyzikálního ladění je, že absolutní výšky tónu c lze ve všech jeho oktávách vyjádřit jako celistvé mocniny čísla 2. Frekvence C₂ je 16 Hz = 2⁴Hz, kmitočet C₁ = 2⁵, kmitočet c⁵ = 2¹² = 4096 Hz. Fyzikálního ladění se výhradně používá při akustických měřeních, protože při nich je velmi výhodné počítat s logaritmy intervalů, což toto ladění podstatně zjednodušuje.

6. PŘIROZENÁ ŘADA TÓNŮ

U plechových nátrubkových nástrojů rozeznáváme z hlediska akustického tři odlišné typy: *trubky, lesní rohy a pozouny*. Žádný z těchto nástrojů nemá v korpusu hmatové otvory. Při neproměnné délce by proto nástroj mohl vydávat vedle základního tónu pouze tóny přirozené harmonické řady technikou přefukování. Tak tomu je u přirozeného lesního rohu a u přirozené trubky. Protože korpus lesních rohů i trubek má velmi úzké kuželové vrtání, vydávají oba typy těchto nástrojů poměrně lehce harmonické tóny až do pořadového čísla 18 a mnohdy i vyššího. Základní tón však u nich není možné vytvořit. Přirozená tónová řada u trubky nebo lesního rohu se základním tónem C obsahuje tyto svrchní harmonické tóny:

2. c
3. g
4. c¹
5. e¹
6. g¹
7. b¹

8. c^2
9. d^2
10. e^2
11. f^{2+}
12. g^2
13. gis^{2+}
14. b^{2-}
15. h^2
16. c^3
17. cis^3
18. d^3

(znaménka + a - značí, že příslušné tóny znějí poněkud výše nebo níže, než udává název tónu v přirozeném ladění).

V orchestru se dalo užít přirozených trubek a rohů jen ve velmi omezeném rozsahu. Pro hudební praxi měly význam většinou jen tóny jednou a dvakrát čárkované oktávy (klariny). Odchylky ve výškách tónů se vyrovnávají u přirozených trubek a rohů částečným krytím roztrubu a tím vlastně jeho prodlužováním (například u lesních rohů).

7. TABULKA HLADIN HLASITOSTI VE FONECH

Zvukový zdroj	Hladina hlasitosti (Ph)
šepot	15
tikot hodinek	20-25
velmi slabý uliční hluk	30-35
tlumený hovor	40
hovor střední hlasitosti	50-55
hluk v ulicích velkého města	70-100
motocykl bez tlumiče	90-110
hluk v blízkosti letadla	110-130
extrémní beatová hudba	110-130

8. VELKÁ A MALÁ DIESIS

U přirozeného ladění existují dva zvláštní intervaly. Jsou to intervaly *velké a malé diesis*. Vezmeme-li čtyři za sebou jdoucí intervaly malé tercie, například $c-es$, $es-ges$, $ges-heses$ a $heses-deses^1$, zjistíme, že tón $deses^1$ jako dvakrát snížený tón d , který by měl splynout s tónem c^1 , je ve skutečnosti poněkud vyšší než tón c^1 . K tónu $deses^1$ totiž dospějeme čtyřmi kroky malých tercií, tj. $(6/5)^4 = 1296/625$, což je číslo větší než 2, kdežto relativní výška tónu c^1 jako oktávy od c je 2. Rozdíl obou intervalů je $(6/5)^4:2 = 648/625$. Je to interval, který se rovná přibližně trojnásobku syntonického kommatu. Tón $deses^1$ je tedy zřetelně a slyšitelně vyšší než c^1 . Tento interval nazýváme *velká diesis*.

Jestliže nad sebe umístíme tři po sobě jdoucí velké tercie, například $c-e$, $e-gis$ a $gis-his$, dospějeme podobným postupem k intervalu $128/125$. His je sice tón velmi blízký tónu c^1 , ale jeho relativní výška je poněkud nižší než 2. Tento interval nazýváme *malá diesis*. Je přibližně dvakrát vyšší než syntonické komma. Intervaly velké a malé diesis se nacházejí vždy mezi každými dvěma sousedními členy enharmonické stupnice.

9. TABULKA FREKVENCÍ TÓNŮ DVANÁCTISTUPŇOVÉHO TEMPEROVANÉHO LADĚNÍ

tón	frekvence (Hz)	oktáva
C_2	16,35	subkontraoktáva
$Cis_2(Des_2)$	17,32	
D_2	18,35	
$Dis_2(Es_2)$	19,44	
E_2	20,60	
F_2	21,83	
$Fis_2(Ges_2)$	23,13	
G_2	24,50	
$Gis_2(As_2)$	25,96	
As_2	27,50	
$Ais_2(B_2)$	29,13	
H_2	30,87	
C_1	32,70	kontraoktáva
$Cis_1(Des_1)$	34,64	
D_1	36,70	

tón	frekvence (Hz)	oktáva
Dis ₁ (Es ₁)	38,89	
E ₁	41,20	
F ₁	43,65	
Fis ₁ (Ges ₁)	46,25	
G ₁	49,00	
Gis ₁ (As ₁)	51,91	
A ₁	55,00	
Ais ₁ (B ₁)	58,26	
H ₁	61,73	
C	65,41	velká oktáva
Cis(Des)	69,28	
D	73,41	
Dis(Es)	77,78	
E	82,41	
F	87,31	
Fis(Ges)	95,50	
G	98,00	
Gis(As)	103,83	
A	110,00	
Ais(B)	116,54	
H	123,46	
c	130,82	malá oktáva
cis(des)	138,57	
d	146,83	
dis(es)	155,56	
e	164,81	
f	174,63	
fis(ges)	185,00	
g	196,00	
gis(as)	207,65	
a	220,00	
ais(b)	233,08	
h	246,93	
c ¹	261,93	jednočárová oktáva
cis ¹ (des ¹)	277,14	

tón	frekvence (Hz)	oktáva
d ¹	293,97	
dis ¹ (es ¹)	311,13	
e ¹	329,63	
f ¹	349,25	
fis ¹ (ges ¹)	370,00	
g ¹	392,00	
gis ¹ (as ¹)	415,31	
a ¹	440,00	
ais ¹ (b ¹)	466,16	
h ¹	493,87	
c ²	523,25	dvoučárková oktáva
cis ² (des ²)	554,37	
d ²	587,34	
dis ² (es ²)	622,25	
e ²	659,25	
f ²	698,50	
fis ² (ges ²)	740,00	
g ²	784,00	
gis ² (as ²)	830,63	
a ²	880,00	
ais ² (b ²)	932,31	
h ²	987,75	
c ³	1046,50	tříčárková oktáva
cis ³ (des ³)	1108,75	
d ³	1174,67	
dis ³ (es ³)	1244,50	
e ³	1318,50	
f ³	1397,00	
fis ³ (ges ³)	1480,00	
g ³	1568,00	
gis ³ (as ³)	1661,25	
a ³	1760,00	
ais ³ (b ³)	1864,63	
h ³	1975,50	

tón	frekvence (Hz)	oktáva
c ⁴	2093,00	čtyřčárkovaná oktáva
cis ⁴ (des ⁴)	2217,50	
d ⁴	2349,35	
dis ⁴ (es ⁴)	2489,00	
e ⁴	2637,00	
f ⁴	2794,00	
fis ⁴ (ges ⁴)	2960,00	
g ⁴	3136,00	
gis ⁴ (as ⁴)	3322,50	
a ⁴	3520,00	
ais ⁴ (b ⁴)	3729,25	
h ⁴	3951,00	
c ⁵	4186,00	

10. POROVNÁNÍ FYSIKÁLNÍHO, PŘIROZENÉHO A TEMPEROVANÉHO LADĚNÍ

V tabulce jsou zapsány frekvence všech tónů *c* a tónu *a*¹ ve fyzikálním, přirozeném a temperovaném ladění.

Tón	Ladění (Hz)		
	fyzikální	přirozené	temperované
a ¹	430,50	440,00	440,00
C ₂	16,00	16,50	16,35
C ₁	32,00	33,00	32,70
C	64,00	66,00	65,40
c	128,00	132,00	130,80
c ¹	256,00	264,00	261,60
c ²	512,00	528,00	523,30
c ³	1024,00	1056,00	1046,60
c ⁴	2047,00	2112,00	2093,20
c ⁵	4096,00	4224,00	4186,40

11. VZESTUPNÉ SEŘAZENÍ ZÁKLADNÍCH INTERVALŮ V PŘIROZENÉM, PYTHAGOREJSKÉM A TEMPEROVANÉM LADĚNÍ V CENTECH

Označení intervalu	Velikost intervalu v centech
cent	1,00
temperovaný dvanáctinotón	16,67
syntonické komma	21,50
pythagorejské komma	23,50
temperovaný šestinotón	33,33
malá diesis	41,10
temperovaný čtvrttón	50,00
velká diesis	62,50
temperovaný třetinotón	66,67
malý přirozený půltón	70,70
limma (malý pyth.půltón)	90,20
temperovaný půltón	100,00
velký přirozený půltón	111,20
apotomé (velký pyth.půltón)	113,70
přirozený malý celý tón	182,40
temperovaný celý tón	200,00
přirozený velký celý tón	182,40
pythagorejská malá tercie	294,20
temperovaná malá tercie	300,00
přirozená malá tercie	315,70
přirozená velká tercie	386,30
temperovaná velká tercie	400,00
pythagorejská velká tercie	407,90
přirozená kvarta	497,50
pythagorejská kvarta	497,50
temperovaná kvarta	500,00
přirozená zvětšená kvarta	590,30
temperovaná zvětšená kvarta	600,00
temperovaná kvinta	700,00
přirozená kvinta	702,00
pythagorejská kvinta	702,00
pythagorejská malá sexta	792,10

Označení intervalu	Velikost intervalu v centech
temperovaná malá sexta	800,00
přirozená malá sexta	813,7
přirozená velká sexta	884,30
temperovaná velká sexta	900,00
pythagorejská velká sexta	905,80
temperovaná malá septima	1000,00
přirozená malá septima	1017,60
přirozená velká septima	1088,80
temperovaná velká septima	1100,00
velká pythagorejská septima	1109,80
oktáva	1200,00

12. TÓNOVÉ ROZSAHY NĚKTERÝCH DNES UŽÍVANÝCH HUDEBNÍCH NÁSTROJŮ

Akordeon (harmonika)	120 basů F-fis ¹ , 42 kláves e-a ³
Anglický roh F	e-b ²
Balalajka prima	e ¹ -a ³
Banjo	g-e ³
Basetový roh F	F-c ³
Basklarinet B	C-e ³
Basová trubka B	E-b ¹
Brač	d ¹ -e ³
Celesta	c ¹ -c ⁵
Cembalo malé	C-d ³
Cembalo velké	F ₁ -f ³
Cimbál maďarský	E-c ³ (e ³)
Dudy Es (chodské)	b, d ¹ , es ¹ , f ¹ , g ¹ , as ¹ , b ¹ , c ² , huk - Es
Eufonium (baryton)	B ₁ -c ²
Fagot	B-f ²
Flétna příčná	h-c ⁴
Gong	gongy jsou laděny vždy na jeden tón v rozmezí c-c ¹
Harfa	Ces ₁ -fes ⁴ (ges ⁴)
Harmonium	C-c ³
Helikón B	E ₁ -b

Helikón F	H ₁ -f ¹
Hoboj	b-f ³
Housle	g-g ⁴ (c ⁵)
Klarinet A	cis-e ³
Klarinet B	d-f ³
Klarinet C	e-g ³
Klarinet Es	g-b ³
Klavír	A ₂ -a ⁴ (c ⁵)
Kontrabas čtyřstrunný	E ₁ -g
Kontrabas pětistrunný	C ₁ -g
Kontrafagot	A ₂ (B ₂)-f
Kornet B	es-d ³
Křídlovka B	es-d ³
Křídlovka basová (tenor).	E-b ¹
Kytara	E-e ³
Kytara havajská	E-a ²
Lesní roh F	H ₁ -f ²
Loutna	E-a ²
Mandolina	g-a ³
Marimba	f-f ³
Pianino	A ₂ -a ⁴ (c ⁵)
Pikola	d ² -c ⁵
Pozoun altový	A-g ²
Pozoun basový	H ₁ -f ¹
Pozoun kontrabasový	E ₁ -f ¹
Pozoun tenorový	E-c ²
Roh anglický	es-b ²
Saxofon altový Es	d-g ²
Saxofon barytonový Es	D-as ¹
Saxofon basový B	A ₁ -es ¹
Saxofon sopránový B	a-cis ³
Saxofon tenorový B	A-es ²
Templbloky	jednotlivě jsou laděny mezi f-f ²
Trubka B	es-d ³
Trubka C	fis-e ³
Tuba basová	F ₁ -f ¹

Tuba kontrabasová	A ₂ -f
Tympán nejmenší	e-a
Tympán největší	D-A
Tympán menší	c-f
Tympán větší	F-c
Ukulele	a-d ³
Varhany	C ₂ -c ⁵
Vibrafon	f-f ³
Viola	c-a ³
Viola da gamba	A ₁ -cis ²
Viola d°amour	d-a ³
Violoncello	C-a ² (e ³)
Xylofon	c ¹ -c ⁴
Zobcová flétna alt F	f ¹ -g ³
Zobcová flétna bas F	f-g ²
Zobcová flétna soprán C	c ² -d ⁴
Zobcová flétna tenor C	c ¹ -d ³
Zvonkohra	c ¹ -g ⁴
Zvony	roury jsou laděny vždy na jeden tón v rozmezí c-c ²

13. LADĚNÍ NĚKTERÝCH DNES UŽÍVANÝCH CHORDOFONŮ

balalajka alta	e,e,a
balalajka bassa	E,A,d
balalajka contrabassa	E ₁ ,A ₁ ,D
balalajka piccola	h ¹ ,e ² ,a ²
balalajka prima	e ¹ ,e ¹ ,a ¹
balalajka seconda	a ¹ ,a,d ¹
banjo čtyřstrunné	g,d ¹ ,a ¹ ,e ² (dvojmo)
banjo pětistrunné	c ¹ ,g ¹ ,h ¹ ,d ² ,g ²
banjo šestistrunné	g,d ¹ ,g ¹ ,h ¹ ,d ² ,g ²
banjo sedmistrunné	g,c ¹ ,d ¹ ,g ¹ ,h ¹ ,d ² ,g ²
banjo sedmistrunné (starší lad.)	g ² ,g,c ¹ ,d ¹ ,g ¹ ,h ¹ ,d ²
bas jihlavský (Ploschperment)	D,G,d,d
berde	G,G,D,d
bisernica	d ² ,d ² ,d ² ,d ²

brač 1	d ¹ ,d ¹ ,d ¹ ,d ¹
brač 2	g,g,d ¹ ,d ¹
brač 3	g,g,d ¹ ,d ¹
bugaria 1	h,d,g,g
bugaria 2	g,h,d ¹ ,d ¹
citera, bavorské ladění	c,g,d ¹ ,a ¹ ,a ¹ + doprovod.str.
citera, vídeňské ladění	c,g,g ¹ ,d ¹ ,a ¹ + doprovod.str.
housle	g,d ¹ ,a ¹ , e ²
kontrabas čtyřstrunný	E ₁ ,A ₁ ,D,G
kontrabas pětistrunný	C ₁ ,E ₁ ,A ₁ ,D,G
kontrabrač	G,G,d,d
kontrašica	d ² ,d ² ,d ² ,d ²
kytara	E,A,d,g,h,e ¹
kytara havajská	E,A,e,a,cis ¹ ,e ¹
loutna kytarová	dnešní ladění E,A,d,g,h,e ¹
mandola	F,G,A,d,g,h,e ¹ ,a ¹
mandolina	g,d ¹ ,a ¹ ,e ² (dvojmo)
skřipky jihlavské malé	g,d ¹ ,a ¹ ,e ²
skřipky jihlavské velké	g,d ¹ ,a ¹
ukulele	a,d ¹ ,fis ¹ ,h ¹
viola	c,g,d ¹ ,a ¹
violoncello	C,G,d,a

14. AKUSTICKÝ VÝKON NĚKTERÝCH HUDEBNÍCH NÁSTROJŮ

Housle ve fortissimu	0,001 W
Dřevěné dechové nástroje	0,01 W
Nátrubkové nástroje	0,1 W
Klavír	0,1 W
Varhany (pleno) max.	10,0 W
Tympány a buben max.	10,0 W
Symf.orchestr (fortissimo)	50,0 W

ZÁKLADY HUDEBNÍ AKUSTIKY

Pavel Kurfürst

Vydala Masarykova univerzita v Brně
roku 2000

Náklad 100 výtisků, 1. vydání, 2000

AA – 1,76 VA – 1,85

Vytisklo Vydavatelství MU
Areál Kraví hora, Brno

Pořadové číslo 3224–17/99

ISBN 80–210–2333–3