

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

39. Maskování tónu tónem nebo hlukem. Silnější tón téže frekvence přehluší tón slabší. To znamená, že se hlasitostí těchto tónů jednoduše v uchu nescítají, ale že slyšíme tón s vyšší hlasitostí, pokud převyšuje tón s nižší hlasitostí alespoň o 7 dB. Maskovací efekt však vzniká 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 kryje 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 pětkrát 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 odvodil z pěti vzestupných kvint, od nichž odečetl tři oktávy – tento 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 nesnází 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 čtyřřiadvaceti, 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 rozkvy*. 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:

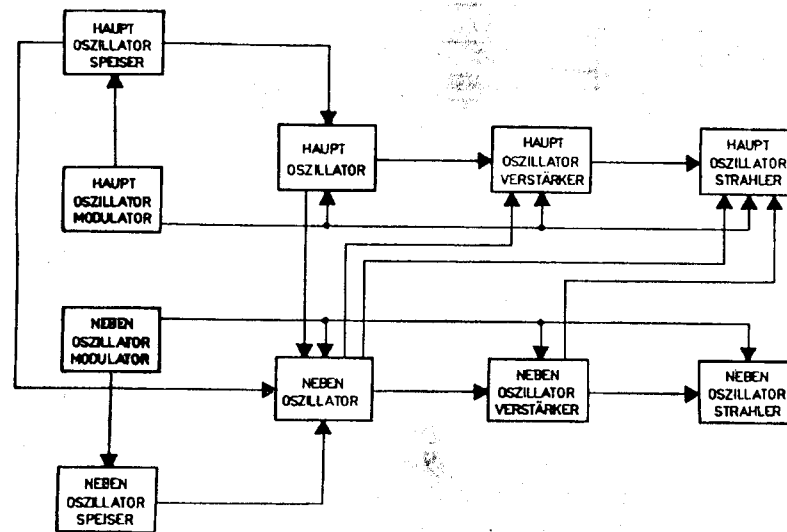
Špelda, Antonín: Hudební akustika. Praha 1978.

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 podílí 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.

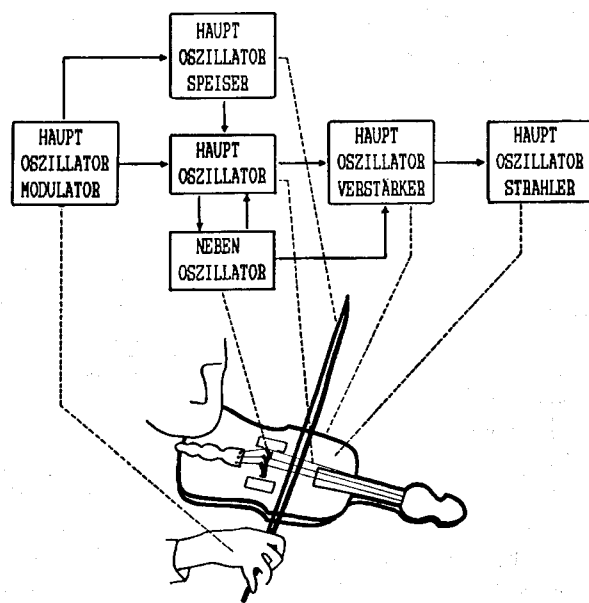
Z velkého množství klasifikačních kritérií hudebních nástrojů je jedno z nejdůležitějších to, které vyplývá z pohledu na ně jako na akustické zdroje. Prozatím však tento zřetel nebyl v žádné z dosavadních systematick hudebních nástrojů uplatněn naprosto důsledně. Pokud se s ním v některých systematickách 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 vysílače). 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

vlastní dutina,
vnější dutina,
deska,
blána,
struna,
tyč

D) Změna frekvence hlavního oscilátoru:

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

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

I) Počet hlav. oscilátorů:
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

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

H) Kmity hlav. oscilátoru:
tlumené,
relativně netlumené

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

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

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

blána,
struna,
tyč,
zesilovač hlav. osc.

O) Kmity vedl. oscilátoru:
tlumené,
relativně netlumené

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

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

P) Počet vedlejších oscilátorů:
jeden,
více

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

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

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. Hornostel-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 systematické určeny napáječem, chrodofony 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 kmitů 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 – napájená prstem nebo plektrem. 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 má 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 ploše 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 kobyly 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 kobyly. 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 úplně 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 kobyly 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 kobyly 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 kobyly. 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 kobyly 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 kobyly, příslušející struně *e*. Bylo nutné zvolit správný způsob pro snímání kmitů zubu kobyly 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 budič jednotka se skládala z výkonového tónového generátoru (150 W/600 Ú), jehož produkt byl kontrolován paralelně připojeným osciloskopem (kontrola průběhu – tvaru budičích kmitů) a čítačem (kontrola výstupního kmitočtu). Budič element byl umístěn v místech, kde je struna při hře rozeznávána 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 kobyly byl problém daleko nesnadnější, protože amplitudy zubu jsou velmi malé a jakékoliv přídavné zařízení tyto kmity ještě ztlumí. Proto bylo upuštěno od všech snímačů dotykových (piezoelektrických a miniaturních geofonů). Nepoužil jsem také snímače kapacitního, protože i když snímá kmity bezdotykově, musí se na zub kobyly 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 kobyly. 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 kobyly. 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 kobyly 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 kobyly, 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 kobyly a čítačem jejich kmitočet.

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 mikrofonem. 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 přeskakovaním tónu v rychlých intervalech do vyšších harmonických. Tón se jeví jako „hlučný“. 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 neprodejné. Tento jev byl a je pro většinu houslařů a houslistů nevysvětlitelný. Proto vždy byla jeho existence provázena 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, děje 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 kmitových 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 píšťalám, 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	-	$4/5$	=	$1/4$ m
	-	$13/5$	=	$1/2$ m
	-	$31/5$	=	1 m
	-	$62/5$	=	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 Assotiation) 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 břešnější, 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 dvojím 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. c²
9. d²
10. e²
11. f²⁺
12. g²
13. gis²⁺
14. b²⁻
15. h²
16. c³
17. cis³
18. d³

(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). Odchyly 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
tíkot 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	jednočárovaná 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 a¹ 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