

Fyzikální příčinnosti barvy zvuku píšťalových varhan

Václav Syrový
Hudební fakulta AMU

The pipe organ is without question the most complicated musical instrument from view of technical, architectonic and especially acoustical aspects. Concurrently the organ is made from the ensemble of the simplest musical sound sources – labial pipes with the exactly determined pitch, loudness, timbre and place position in face of listener. **The basic physical causalities of the organ sound timbre** result from: 1. the mechanism of tone generation in the labial pipe, 2. the philosophy of the organ sound structure, 3. the radiation and propagation of the organ sound. The paper deals with the influence of the scaling, voicing and placing of individual pipes, stops and whole pipeworks on the timbre perception.

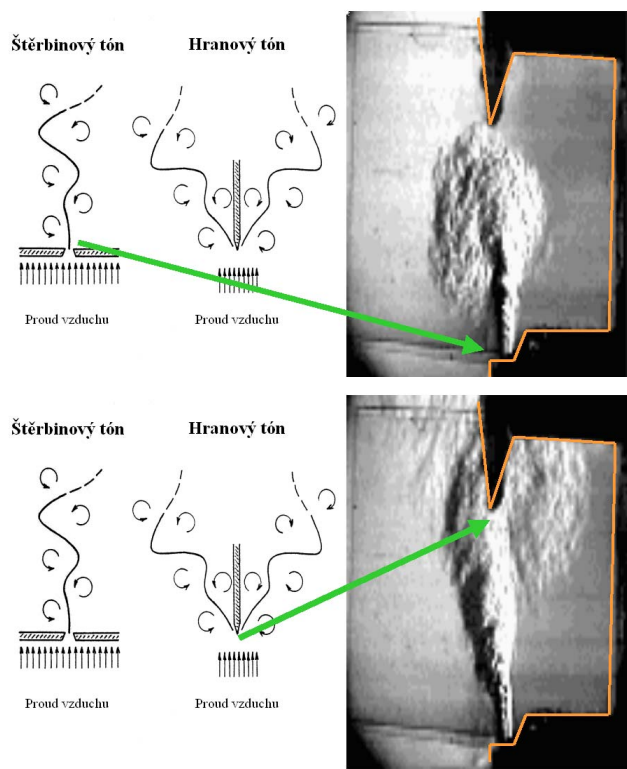
1. ÚVOD

Píšťalové varhany bezesporu představují výjimečný hudební nástroj jak po stránce technické a architektonické, tak zejména po stránce zvukové. Výchozím zdrojem varhanního zvuku je retná píšťala, která patří fyzikálně i konstrukčně k nejjednodušším hudebním nástrojům s pevně nastavenou výškou, hlasitostí a barvou tónu včetně prostorové lokalizace v celku varhan a zvukové návaznosti na akustické vlastnosti daného prostoru. Fyzikální příčinnosti barvy zvuku varhan vycházejí z mechanismu vzniku tónu v retné píšťale, dále z filosofie struktury varhanního zvuku a nakonec souvisejí též s jeho vyzářováním a dalším šířením v reálném prostoru.

2. VZNIK TÓNU V RETNÉ PÍŠŤALE

Analytický model hudebního nástroje tvoří propojení budicího mechanismu (excitátoru) jako zdroje energie s vlastním kmitajícím mechanismem (oscilátorem) a následným rezonátorem, který obvykle též umožňuje vyzáření zvukové energie do okolního prostoru. Vymezení jednotlivých částí nečiní u většiny hudebních nástrojů zvláštní obtíže. Např. u houslí je to sestava smyčce, struny a ozvučné skříňky, u klavíru sestava kladívka, struny a ozvučné desky, u klarinetu sestava proudu vzduchu, třtinového plátku a vzdušného sloupce v nástroji, u tympanu zase sestava paličky, membrány a vzdušného objemu v kotli nástroje.

U retné píšťaly je však vymezení oscilátoru, který je buzen vzduchem proudícím nohou píšťaly a který rozkmitává vzdušný sloupec těla píšťaly, na první pohled méně zřejmé a tradičně je spojováno se vznikem tzv. třecích tónů, které popsal v roce 1878 český fyzik Čeněk Strouhal. Je-li proud vzduchu veden skrz úzkou štěrbinu s ostrým vyústěním, mění se ustálený vzdušný tok v turbulentní proudění. Podobný jev nastává též při proudění vzduchu přes ostrou hranu. Po obou stranách štěrbinu či hrany se potom tvoří periodicky opakující se vzdušné víry, které odpovídají tlakovým změnám vzduchu. Periodicita vzdušných vírů dává vznik třecím tónům, které zřetelně provázejí např. rychlé mávnutí holí či prásknutí bičem, avšak při běžných rychlostech proudění vzduchu mají tyto třecí tóny velmi malou intenzitu.



Obr. 1 Strouhalovy třecí tóny v ústech píšťaly

Uspořádání úst u retné píšťaly skýtá dobré podmínky pro vznik třecích tónů, které se dokonce někdy rozlišují na tzv. štěrbinové tóny, tj. tóny vznikající průchodem vzduchu průlinkou mezi spodním rtem a jádrem, a na hranové tóny, tj. tóny vznikající nárazem vzdušného svazku na hranu horního rtu. Frekvence třecího tónu stoupá v podstatě lineárně s rychlostí proudění vzduchu a tím i s druhou odmocninou tlaku vzduchu. Dosáhne-li frekvence třecího tónu přibližně frekvenci, na kterou je píšťala naladěna, dojde k nasazení tónu. S dalším zvyšováním tlaku vzduchu stoupá frekvence třecího tónu dále, ale frekvence tónu píšťaly stoupá podstatně pomaleji.

Ústa píšťaly jsou přímo spojena se vzdušným sloupcem, který se vyznačuje velmi výraznými rezonančními vlastnostmi a který nad třecími tóny energeticky převažuje. Vliv vzdušného

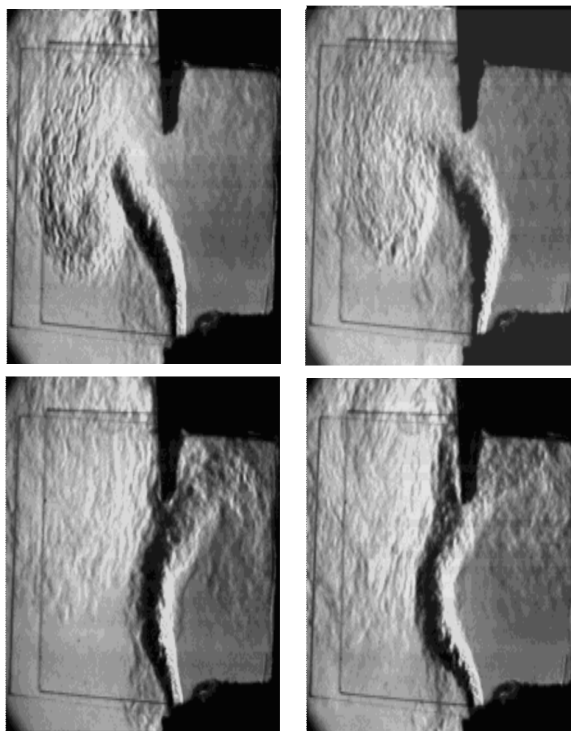
sloupce je však natolik velký a specifický, že dokonce podstatně mění i popsaný mechanismus třecích tónů. Původně se předpokládalo, že poměry v ústech píšťaly lze plně vysvětlit existencí třecích tónů, jak bylo výše uvedeno. Metody zviditelňování zvuku však odhalily skutečný oscilátor – vzdušný jazýček v ústech píšťaly, který se v mnohém značně liší od mechanismu třecích tónů neovlivněných vzdušným sloupcem. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že mechanismus třecích tónů vychází z konstantní výšky výřezu úst a lineárně mění frekvenci tónu s rychlostí proudění vzduchu, kdežto reálná píšťala z akustického hlediska předpokládá konstantní frekvenci produkovaného tónu bez ohledu na frekvenci třecích tónů. Tento zdánlivě neřešitelný rozpor vysvětluje existence vzdušného jazýčku proměnné délky.

Kmitání vzdušného jazýčku si lze představit jako superpozici kmitů jazýčku vetknutého do průlinky píšťaly a kmitů pístu o průřezu úst píšťaly. Vzdušný jazýček je poměrně ostře ohraničen a nemá charakter vzdušných vírů jako třecí tóny. V průběhu periody mění však svoji efektivní délku, což z akustického hlediska představuje vlastně proměnnou účinnou výšku výřezu. Režim kmitů vzdušného jazýčku lze ovlivnit jednak polohou hrany horního rtu

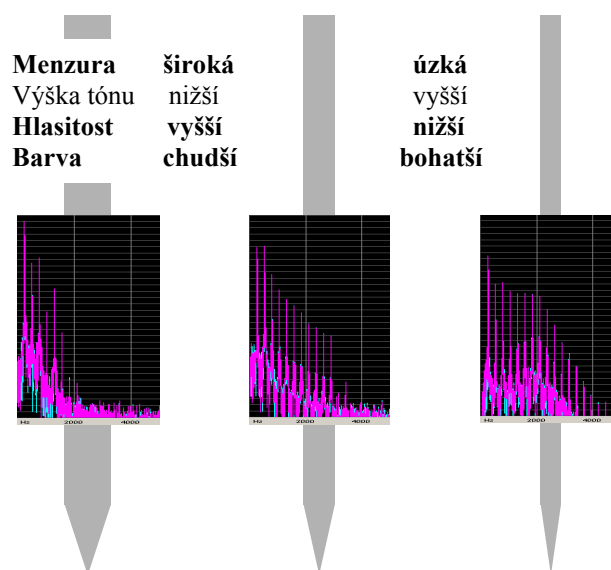
vůči průlince, jednak provedením průlinky, tzn. její šířkou, úkosem jádra píšťaly a vpichy na jádře. Uvedené intonační zásahy se promítají jak do charakteru, tak do barvy tónu píšťaly. Vychýlení kmitů vzdušného jazýčku dovnitř píšťaly vede k silnějšímu, ale barevně “chudšímu” tónu, vychýlení ven z píšťaly k slabšímu, ale barevně “bohatšímu” tónu. Vpichy na jádře vedou k omezení vzniku hlukových a šumových složek při nasazení tónu a usnadňují intonaci píšťaly.

Vlastnosti varhanního tónu jsou však v mnohem větší míře určovány vlastnostmi rezonátoru – vzdušného sloupce, který ve spřaženém systému se vzdušným jazýčkem energeticky evidentně převažuje. Frekvence tónu retné píšťaly je dána délkou vzdušného sloupce a typem jeho uzavření. Každá píšťala má vždy otevřený konec ve svých ústech a otevřený, krytý (uzavřený) či polokrytý (částečně uzavřený) konec na svém ústí. Funkční délka vzdušného sloupce, která určuje výšku tónu píšťaly, je větší než odpovídající mechanický rozměr. Vzdušný sloupec je totiž zatížen vyzařovací impedancí úst a ústí (v případě otevřené píšťaly) a tato impedance je závislá nejenom na tvaru a rozměru otvoru, ale též na frekvenci tónu píšťaly. Proto průměr píšťaly ovlivňuje jak stupeň neharmonicity rezonančních módů vzdušného sloupce, tak též úroveň vyšších harmonických složek tónu.

Se stoupajícím průměrem či průřezem klesá obsah vyšších harmonických složek v tónu, který se stává “kulatějším” a naopak. Obsah harmonických složek určuje též tvar vzdušného sloupce, který vedle válcového může být též kuželový nebo trychtýřový příp. též kombinovaný. Rozměrové vztahy jedné píšťaly a mezi píšťalami navzájem jsou označovány jako tzv. menzura, která zásadním způsobem ovlivňuje charakter tónu, především pak jeho barvu jak ve smyslu jednotlivých rejstříků, tak ve smyslu závislosti na výšce tónu v průběhu každého rejstříku.



Obr. 2 Základní fáze pohybu vzdušného jazýčku v ústech píšťaly

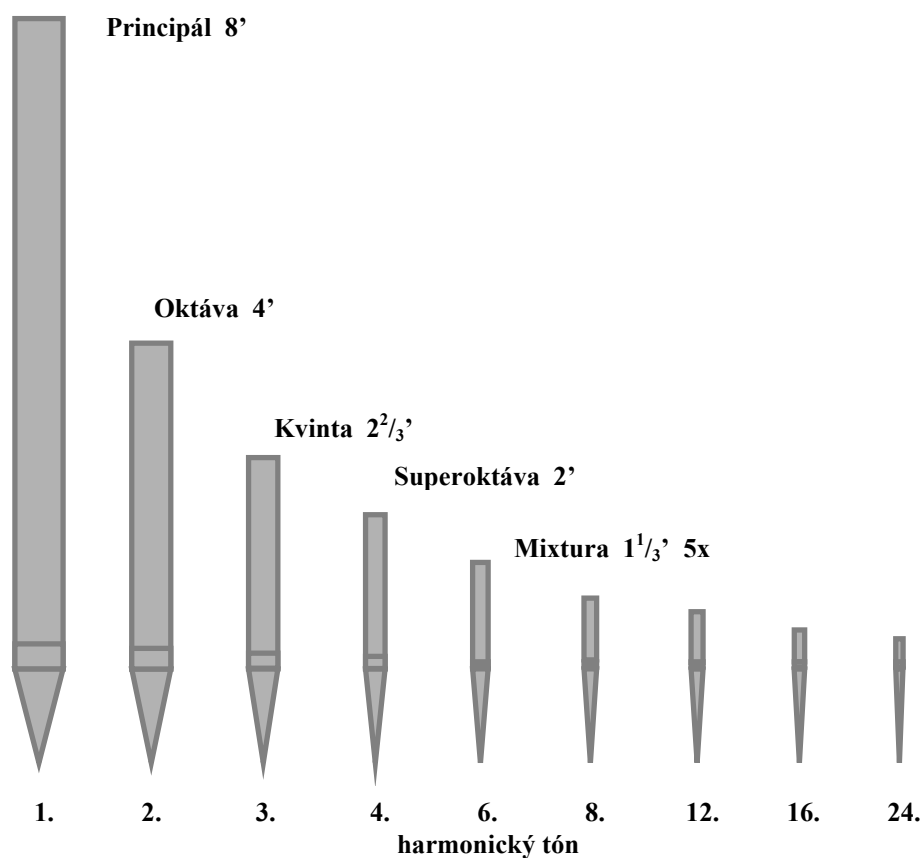


Obr. 3 Vliv menzurae píšťaly na vlastnosti tónu

3. STRUKTURA VARHANNÍHO ZVUKU

Zvuk varhan ve své dominantní podobě je dán “součtem” tónů různých řad píšťal – jednotlivých rejstříků, které se od sebe zvukově odlišují ve výšce, hlasitosti a barvě (včetně

charakteru nasazení) tónu, a v příslušnosti k logickému celku varhan – tzv. stroji, který je přesně vymezen jak po zvukové, tak prostorově lokalizační stránce. Do návrhu rejstříkové dispozice varhan se promítá jednak princip výstavby zvukové pyramidy ve smyslu součtové



Obr. 4 Zvuková pyramida principálového sboru – pléno varhan

zvukové syntézy a jednak princip sborový a také strojový. Sborový princip staví na kontrastu zvuku úzkých píšťal principálových a širokých píšťal flétnových a bývá často doplněn o ještě kontrastnější nejužší píšťaly smyků a funkčně i zvukově zcela odlišné jazykové rejstříky. Strojový princip je založen na kontrastu zvuku původně zcela samostatně stojících nástrojů (hlavní varhany, positiv, portativ, regál aj.), které jsou přiřazeny v rámci jednoho společného nástroje jeho jednotlivým manuálům (klaviaturám) a které dohromady tvoří logický celek.

Důsledně vystavěná zvuková pyramida principálových rejstříků, která sleduje jejich výškovou polohu v pozici harmonických tónů, vede k základní zvukové hodnotě varhan – k tzv. pléno konkrétní zvukové síly, výškové polohy a vyváženosti ve vztahu k prostoru a příslušnosti ke zvolenému stroji. Pléno představuje též hranici mezi nově vzniklým zvukovým celkem a zcela nesmíselnou zvukovou emulzí jednotlivých rejstříků, tj. zlatý řez mezi zvukovou jednotou a kontrastem, na jejichž vztahu je založena filosofie zvuku varhan. Výstavba pléna odráží podle nejrůznějších empirických vztahů především velikost prostoru, ve kterém jsou varhany umístěny, a počet posluchačů.

Velikost prostoru určuje hlavně menzuraci principálového sboru, dále polohu základny principálového sboru, tj. výškově nejnižšího principálového rejstříku a velikost zvukové koruny jako protipólu základny. Zvukovou korunou je rejstřík sestavený z několika řad píšťal principálové menzury ve vzájemných oktávových a kvintových vztazích – tzv. mixtura. Typickou vlastností mixtury je repetice jejich řad, tzn. opakování sledu píšťal o oktávu nebo kvintu níže. Repetice má svůj důvod vedle výrobní hranice píšťal hlavně ve zvukové vyváženosti varhanního pléna.

zvukové syntézy a jednak princip sborový a také strojový. Sborový princip staví na kontrastu zvuku úzkých píšťal principálových a širokých píšťal flétnových a bývá často doplněn o ještě kontrastnější nejužší píšťaly smyků a funkčně i zvukově zcela odlišné jazykové rejstříky. Strojový princip je založen na kontrastu zvuku původně zcela samostatně stojících nástrojů (hlavní varhany, positiv, portativ, regál aj.), které jsou přiřazeny v rámci jednoho

Výjimečnost zvuku varhan nespočívá pouze ve fyzikální logice jeho vertikální struktury, ale také ve variabilitě, kterou umožňuje registrace – součet zvolených rejstříků. Po čistě akustické stránce řeší registrace obecný princip syntézy zvuku, a to součtové syntézy ve vertikálním směru a rozdílové syntézy v horizontálním směru zvukové pyramidy. Na rozdíl od zvukových syntezátorů vychází varhanní součtová syntéza z omezeného výběru pozic přísně harmonických tónů, které tvoří neúplnou, se stoupající výškou postupně se zředující řadu převážně sudých násobků frekvence základního tónu. Na těchto pozicích se však nenalézají čisté tóny sinusového průběhu, ale komplexní tóny s více či méně bohatým obsahem vlastních harmonických složek. V horizontální rovině, tj. ve stejné výškové poloze formálně představují komplexní tóny produkty rozdílové zvukové syntézy.

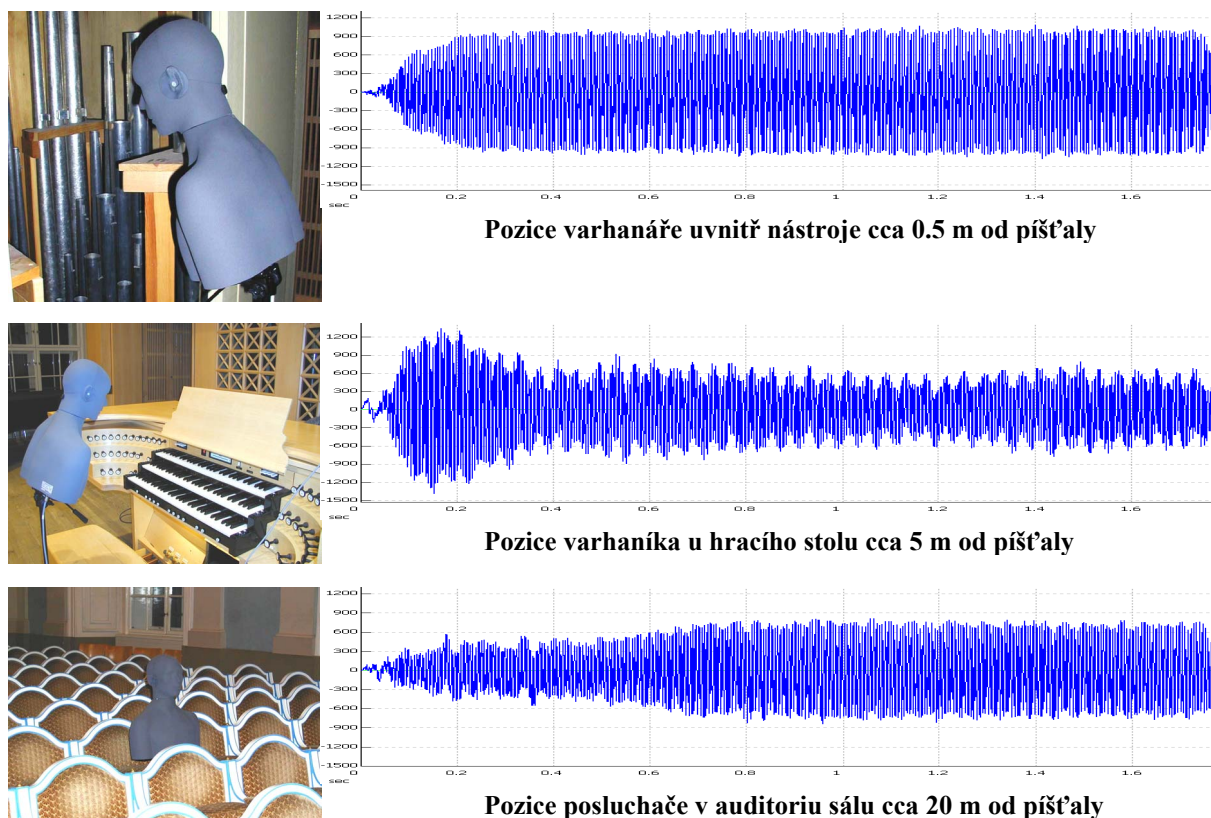
Modulační složka, která v hudební interpretaci představuje nejsilnější výrazový prostředek, je ve varhanách autonomně zastoupena pouze použitím tremola. Ostatní modulační produkty vyplývají ze součtu, přesněji ze subjektivního vjemu dvou a více tónů. K nim náleží jak cílené disponování a registrování hlasů laděných do tzv. výchvěvu, tak i interferenční jevy vzniklé různým stupněm rozladění píšťal a šířením zvuku v reálném prostoru. Tyto interferenční jevy mají silný psychoakustický účinek a přispívají nejenom k posílení vjemu hlasitosti a prostorovosti, ale také jsou významnou součástí barvy zvuku varhan.

4. VYZAŘOVÁNÍ A ŠÍŘENÍ ZVUKU VARHAN

Z hlediska vyzařování zvuku představují varhany soubor (zjednodušeně pojatých) akustických zdrojů dvojího typu: jednoduché zářiče – kryté retné píšťaly s vyzařovacím otvorem v ústech a jazykové píšťaly s vyzařovacím otvorem v ústí ozvučny, a četnější zářiče podobné akustickým dipólům – otevřené (též i polokryté) retné píšťaly se dvěma vyzařovacími otvory (v ústech a ústí). Obecně platí, že se stoupající frekvencí (základních tónů i jejich vyšších harmonických složek) se zužují vyzařovací úhly orientované do osy vyzařovacího otvoru.

Dipólový charakter především dlouhých otevřených píšťal komplikuje vyzařovací poměry varhan naštěstí pouze v blízkém okolí nástroje, ve větší vzdálenosti se projevují dva tzv. hlavní směry vyzařování, které jsou navzájem kolmé. Osy úst většiny retných píšťal jsou orientovány směrem k posluchačům horizontálně do prostoru, ústí otevřených píšťal a ozvučen jazyků naopak vertikálně ke stropu prostoru. Proto konstrukce varhanní skříně a důsledné oddělení jednotlivých strojů má velký význam pro žádoucí směřování zvuku varhan a tím i vjem jeho barvy. Pro zvýšení zvukové účinnosti vůči posluchačům se některé jazykové rejstříky umísťují v horizontální poloze do prospektu varhan (tzv. španělské trumpety) nebo se do této polohy jejich ozvučny “krepují” (ohýbají) (tzv. anglické trumpety).

Zvuk každého hudebního nástroje, tedy i varhan, je vnímán dvěma subjekty – hráčem (varhaníkem), který se nalézá v relativně malé vzdálenosti od píšťal, a posluchačem, který se nalézá daleko v chrámové lodi či auditoriu koncertního sálu. Subjektivní vliv akustických vlastností prostoru a tím i vjem barvy zvuku je dán poměrem intenzity přímých a odražených vln v místě varhaníka a posluchače. U varhan však existuje ještě třetí regulérní poslechové místo, a to uvnitř nástroje v bezprostřední blízkosti píšťal, ve které se nalézá varhanář při ladění a intonaci (seřizování zvuku) nástroje. Rozdíly v barvě daného tónu v uvedených poslechových místech jsou zcela zásadní a vyplývají z vlivu jak vyzařovacích charakteristik odpovídající píšťaly, tak akustických vlastností prostoru. Akustická měření varhan, která se až na naprosté výjimky realizují in situ, musí zmíněné rozdíly respektovat a ve zpracování výsledků zohlednit.



Obr. 5 Časový průběh tónu rejstříku Burdon 16' v základních poslechových pozicích varhan

5. ZÁVĚR

Zvuk varhan představuje jak v charakteru jednotlivých rejstříků, tak ve variabilitě jejich součtu zcela výjimečný a svým způsobem nezastupitelný výchozí materiál i pro obecněji orientovaný výzkum barvy zvuku. Současně klade značné nároky na metodiku snímání zvuku in situ, jeho analýzu i následné zpracování dat při nezbytném akceptování uvedených fyzikálních příčiností.

6. UZNÁNÍ

Príspevek vznikl jako součást řešení výzkumného záměru MSM 511100001 za podpory MŠMT ČR.

Literatura

- [1] Štěpánek, J., Otčenášek, Z., Syrový, V.: Dokumentace a diagnostika zvuku varhan, *Akustické listy*, čís. 17, 12-21, 1999
- [2] Syrový, V., Otčenášek, Z., Štěpánek, J.: *Acoustic Evaluation of the Reconstruction of Heinrich Mundt Pipe Organs in Prague, 17. ICA, Rome, CD IV (Music)*, 2001.
- [3] Syrový, V., Otčenášek, Z., Štěpánek, J.: *Spectral Characteristics of Czech Baroque Pipe Organs, Proceedings of ISMA 2001, Perugia, 477-480*, 2001.
- [4] Syrový, V.: *Vybrané kapitoly z nauky o varhanách*, Nakladatelství AMU, Praha, 2003 (v tisku).
- [5] Syrový, V., Otčenášek, Z., Štěpánek, J.: *Subjective Evaluation of Organ Pipe Timbre in the Standard Listener Position, Proceedings of SMAC 03, Stockholm, 333-336*, 2003.
- [6] Syrový, V.: *Hudební akustika*, Nakladatelství AMU, Praha, 2003.