

## STABILITA LADENIA ORGANOV

ŠTEFAN NAGY – ANDREJ ŠTAFURA

*Ing. Štefan Nagy, ArtD. – Mgr. art. Andrej Štafura; Ústav hudobnej vedy SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava 4; e-mail: stefan.nagy@savba.sk; andrej.stafura@savba.sk*

### ABSTRACT

The article is concerned with stability of the tuning of historic organs which have their wind system supplied, in terms of the positioning of the instrument itself, from an external environment. It addresses the question of temperature changes in sacred buildings, which are an essential magnitude for the analysis. The analysis also touches on the mode of construction used for the wind system, since this construction has a fundamental influence on the constant change of pressure and air temperature in the wind system. We have verified the entire analysis *in situ* under real conditions, also by means of an experiment regarding the analysis of tuning. The positioning of the wind system, sucking in air which differs in temperature from the air where the instrument itself is positioned, does not have any destructive effect on the tuning of historic organs and hence does not damage this tuning in any way.

**Keywords:** stability of tuning, tuning, wind system, adiabatic expansion, historic organ

### Úvod

Organ patrí do skupiny aerofónov a vzduchový systém je nosným systémom tohto nástroja. Vzduchový systém má tak zásadný vplyv na stabilitu ladenia organov z viacerých ohľadov.<sup>1</sup> Túto skutočnosť si stavitelia nástrojov uvedomovali od začiatku, ale vyriešenie tohto problému stability ladenia trvalo ešte mnoho nasledujúcich storočí. Obdobím baroka sa problémy so zásobovaním vzduchu definitívne vyriešili zásobným mechom, zdokonalením klinových mechov či vzduchovodov. Mnohé nástroje mali mechy umiestnené mimo priestoru organa, či už v samostatnej miestnosti, kde mechy

<sup>1</sup> Problematikou stability ladenia organov sa zaoberajú napr. SYROVÝ, Václav: *Hudební akustika*. Praha : Akademie múzických umění v Praze, 2008, s. 277; MEIER, Dieter: *Eigenschaften verschiedener Balgkonstruktionen*. [Skript zum Referat] CH-Männedorf : Orgelbau Kuhn AG. 2006, s. 1-20.

obsluhovalo viacero kalkantov, alebo na povale kostola, prípadne inde, a to všetko z dôvodu, aby nedochádzalo k rušeniu hry na nástroji, ako aj samotného liturgického úkonu. Ako príklad uloženia mecho v 19. storočí mimo priestoru samotného organa nám môžu slúžiť viaceré organy od majstra Martina Šaška z Brezovej pod Bradlom. Pre tohto organára bolo „charakteristické umiestnenie mecha mimo sokla organovej skrine, buď v priestore chóru, alebo mimo chóru“<sup>2</sup>. Jedným z takýchto príkladov je organ v Evanjelickom kostole a. v. v Starej Turej, kde „jednoduchý magazínový mech s čerpacím mechem rovnobežne stúpajúcim je vo veži kostola, kam ho postavili Šaškovi“.<sup>3</sup> Podobné riešenia používali aj iní organári. Koncom 19. a začiatkom 20. storočia sa do kostolov, a teda aj k organom, dostáva elektrická energia, ktorú organári využili na zmenu pri pohone mecho. Ľudskú silu nahradil elektromotor, respektíve najprv boli čerpacie mechy napojené na kľukový hriadeľ a až neskôr bol tento spôsob nahradený rotačným čerpadlom vzduchu.<sup>4</sup> V súčasnosti sa pri stavbe nových nástrojov osadzujú elektromotory aj do samostatných strojovní.

Súčasný postoj k danej problematike sa formoval počas moderných dejín organárstva, keď sa začali nástroje intenzívnejšie opravovať či reštaurovať. Vznikali rôzne náhľady a názory na problematiku stability ladenia. Jedným z hlavných trendov, ktoré sa ujali v priebehu druhej polovice 20. storočia, bola výmena starých hlučných elektromotorov za nové, menej hlučné. Mechy a motory sa začali prenášať čo najbližšie k organu, teda do miestnosti, v ktorej sa nástroj nachádzal, aby bol nasávaný vzduch teplotne rovnaký ako vzduch, v ktorom je uložený samotný nástroj. V tejto súvislosti sme si položili otázku, do akej miery môže umiestnenie vzduchového systému mimo priestoru samotného organa, ktorý nasáva vzduch inej teploty, ako je vzduch v miestnosti, v ktorej je umiestnený samotný organ, ovplyvňovať stabilitu ladenia. Na tieto účely sme vykonali niekoľko meraní a experiment.

## Analýza javu a konštrukcie

Na posúdenie vplyvu teploty nasávaného vzduchu na stabilitu ladenia nástroja sme vychádzali z analýzy, ktorá bola postavená na hodnotení umiestnenia konštrukcie vzduchového systému, niektorých abiotických podmienok, samotnej analýzy stability ladenia a fyzikálnych zákonitostí, ktoré súvisia so skúmaným javom. Experimenty sme robili v reálnych podmienkach, pri ktorých sa do nástroja nasával vzduch z kostolnej veže, ako aj pri reálnom nástroji umiestnenom v kostole, pričom sme simulovali podmienky súvisiace s teplotou nasávaného vzduchu.

<sup>2</sup> MAYER, Marian: *Organ ako hudobný a architektonicko-výtvarný artefakt v tvorbe Martina Šaška*. [Kandidátska dizertačná práca] Bratislava : Umenovedný ústav Slovenskej akadémie vied, 1988, s. 84.

<sup>3</sup> MAYER, Marian Alojz: *Martin Šaško a jeho organárska škola*. Bratislava : Hudobné centrum, 2003, s. 87.

<sup>4</sup> MAYER, Marian Alojz: *Dejiny organa na Slovensku od najstarších čias po súčasnosť*. Bratislava : Divis – SLOVAKIA, spol. s.r.o., 2009, s. 177.

## Konštrukcia vzduchového systému

V súvislosti so skúmaným javom nás prioritne zaujíma technické riešenie vzduchového systému s nasávaním mimo priestoru umiestnenia nástroja. Takýto vzduchový systém organov môžeme rozdeliť na tri časti. Prvá časť je umiestnená mimo priestoru chóru,<sup>5</sup> respektíve priestoru organa a je tvorená elektromotorom a malou časťou vzduchovodu. Súčasťou tejto prvej časti vzduchového systému organa môže byť aj hlavný mech nástroja. Pri takomto riešení vzduchového systému je motor spojený s mechem nástroja, a to buď prostredníctvom regulátora tlaku alebo bez regulácie. Keďže aj v tejto oblasti vzniká diskusia v súvislosti so stabilitou ladenia, museli sme analyzovať aj problematiku regulácie tlaku. Druhá časť daného vzduchového systému sa nachádza medzi motorom a organom a ide o vzduchovody rôznej dĺžky, pričom v niektorých prípadoch merajú aj niekoľko metrov. Posledná časť vzduchového systému sa nachádza vedľa organa alebo pod organom, a ide buď o tzv. vyrovnávací mech a vzdušnicu, ak sa hlavný mech nachádza mimo priestoru chóru, alebo sa na tomto mieste nachádza hlavný mech. V niektorých prípadoch sa na danom mieste nachádza hlavný a zároveň aj vyrovnávací mech. Každá z týchto častí vzduchového systému organov má svoje špecifiká vyplývajúce z prebiehajúcich fyzikálnych dejov, ktoré je potrebné pre správne analyzovanie skúmaného javu poznať.

## Abiotické podmienky

Ďalšou dôležitou súčasťou analýzy je poznanie podmienok, v ktorých sa nachádzajú jednotlivé komponenty vzduchového systému. Tieto podmienky môžu na vzduchový systém nástroja pôsobiť buď pozitívne, negatívne, alebo nepôsobia na vzduchový systém vôbec.

V prípade nástroja, ktorý sa nachádza na chóre kostola, je potrebné brať do úvahy nasledujúce faktory:

1. Teplota na chóre kostola podľa nami nameraných údajov sa pohybuje vždy nad teplotou, ktorá je v prízemnej časti kostola. Rozdiel medzi danými teplotami sa v priemere pohybuje medzi hodnotami 2 – 3 °C. Okrem toho sa zvýšenie teploty nástroja deje aj pôsobením slnečného žiarenia, ktoré môže byť v niektorých prípadoch eliminované vitrážovými sklami okien. V takomto prípade samozrejme stúpa rozdiel v teplotách aj do cca 5 °C v závislosti od počasia. V prípade vitrážových skiel sa teplota priestoru, v ktorom sa nachádzajú, zvyšuje v menšej miere. Ide však o jav, ktorý je potrebné ďalej skúmať, a to v nadväznosti na znižovanie teploty v objekte, čo slúži na lepšiu prevenciu proti drevokaznému hmyzu. Môžeme ale konštatovať, že vnútorná teplota kostola sa bez vplyvu človeka pohybuje v rozmedzí  $\pm 2 \div 3$  °C na deň. Pre úplnosť je potrebné ešte uviesť, že doterajšie merania realizované v tzv. letných mesiacoch nám ukázali, že vnútorná teplota kostolov sa pohybuje vo väčšine prípadov v priemere do 25 °C. V zimných mesiacoch sa teplota dostáva na hodnoty 0 °C resp. 2 až 3 °C pod túto hodnotu, pričom rozhodujúci vplyv majú exteriérové podmienky.

<sup>5</sup> Jeden spôsob je uloženie motora na povale kostola a druhý jeho uloženie vo veži.

2. Ak konštatujeme, že vnútorný priestor kostola predstavuje teplotne stabilný priestor, tak priestor povaly kostola, respektíve vežový priestor je teplotne nestabilnejším v dôsledku výraznejšieho vplyvu externých podmienok. Znamená to, že sa hodnoty teploty priestoru približujú hodnotám teploty v exteriéri, a to tak, že ich do značnej miery kopírujú. Na základe nami nameraných údajov môžeme konštatovať, že teplota na povale kostola sa pohybuje cca  $\pm 5$  °C voči teplote exteriéru v závislosti od ročných období. Samozrejme, že teplota vo vyššej polohe je rovnako vyššia, či už pre stúpanie teplejšieho vzduchu, ako aj z dôvodu nahriatej krytiny, väčšinou plechu, ale rovnako je potrebné povedať, že teplota nestúpa nad teplotu vonkajšieho prostredia, čiže teplota môže stúpnuť nanajvýš o spomínaných cca 5 °C, respektíve v zimných obdobiach aj klesnúť. Sumárne môžeme konštatovať, že pri extrémnych teplotách, ktoré na slnku dosahovali hodnoty až do 37 °C, sme namerali na povale kostola najvyššiu teplotu 31,2 °C, pri teplotách v zimnom období sme namerali teploty mierne pod nulou a to -3,4 °C, ale aj teploty v hodnotách až -7,6 °C.
3. Priebeh zmeny teploty vo vzduchovom systéme nástroja je komplikovaný v dôsledku dejov prebiehajúcich vo vzduchovom systéme organa, preto budeme najprv uvádzať merané údaje a až následne budeme komparatívne údaje posudzovať a interpretovať. Pre nami skúmaný jav je dôležitejšie definovať teploty pri postavení nasávania mimo priestoru organa. Definovať teplotu vstupného, teda nasávaného vzduchu je pomerne jednoduché, pretože závisí od prostredia, v ktorom sa sací ventil, respektíve motor a mech nachádzajú. Budeme pritom vychádzať zo spôsobov umiestnenia mecha a motora nástroja, ktoré sme uviedli vyššie. Na základe toho môžeme tvrdiť, že vstupná teplota nasávaného vzduchu sa pohybuje od vyšších plusových teplôt v hodnotách nad 30 °C v lete až k zimným mínusovým hodnotám okolo -7 °C, ak berieme do úvahy postavenie nasávania mimo priestoru chóru. Ak sa nasávanie vzduchu deje z rovnakého priestoru, v akom sa nachádza organ, tak ide samozrejme o teplotne rovnaký zdroj vzduchu. Teplota vzduchu vo vnútornej časti vzduchovodov je konštantná, avšak pri teplotných zlomoch, ktoré nastávajú pri prechode vzduchovodov z povalového, respektíve vežového priestoru do chórového priestoru, dochádza k odovzdávaniu teplotnej energie, a tým k zmene teploty vzduchu vo vzduchovode. Táto zmena sa deje obidvoma teplotnými smermi, pričom má však minimálne hodnoty. K dôležitejšej zmene v teplote vzduchu dochádza predovšetkým v mechu nástroja. Tu je nasatý vzduch podrobený kompresii pod konkrétnym tlakom, ktorá spôsobuje jeho zohrievanie. Ak je mech nástroja uložený mimo chórového priestoru, tak dochádza k otepľovaniu vzduchu už v tomto bode a daná teplota pokračuje až po ústie do píšťaly. Meraním sme zistili, že rozdiel medzi nasávaným vzduchom a vzduchom, ktorý sa nachádza už vo ventilovej komore, je aj viac ako +10 °C. Celkovo však môžeme konštatovať, že v priebehu celého vedenia vzduchu do nástroja dochádza k rôznym vplyvom, či už prostredníctvom odovzdávania tepla z externého prostredia, vplyvom trenia, alebo aj vplyvom ďalšej zmeny teploty vzduchu vyvolanej tlakom vyrovnávacieho mecha, ktorý je uložený pod vzdušnicou nástroja. Dôležitejšie ale je, že vieme konštatovať, že každý nástroj má svoje vlastné teplotné zmeny, pričom dokážeme vysloviť zovšeobecňujúci princíp, že na ústí do píšťaly nameriame vždy chladnejší vzduch ako

v jej okolí, a to v dôsledku prebiehajúcej adiabatickej expanzie. Z týchto dôvodov je lepšie a praktickejšie sledovať zmeny ladenia a nie zmeny priebehu teploty vzduchu vo vzduchovom systéme, ktorý je pomerne komplikovaný a na meranie problematický.

## Experiment

Doterajšie skúmanie javu na základe komparácie jednotlivých skutočností, respektíve vzájomná analýza doterajších poznatkov poukázali na skutočnosti, ktoré do značnej miery nasvedčujú, že vplyv rozdielnej teploty vzduchu nasávaného do nástroja nezohráva úlohu iniciátora pri rozladovaní nástroja, teda po zvukovej stránke nepoškodzuje nástroj. Tento predpoklad bolo nevyhnutné overiť aj experimentálne, a to už spomínanou analýzou zvuku, respektíve tónov nástroja, ktorý má nasávanie, a teda aj motor, mimo priestoru chóru. Rovnako sme pre dôkladnejšiu analýzu vykonali aj experimentálne zvýšenie nasávanej teploty pri nástroji, ktorý má motor a nasávanie vedľa nástroja. Teplotu sme zvýšili cca o 30 °C, čo je pre reálnu prax dostatočné nadhodnotenie reálnych hodnôt, aby sme mohli spomínaný vplyv vylúčiť aj v extrémnych prípadoch.

### Metóda experimentu

Ako sme už vyššie uvádzali, na experiment sme vybrali nástroj, ktorý má motor uložený mimo priestoru chóru a organa.<sup>6</sup> V tomto prípade ide o motor, ktorý je uložený vo veži kostola, kde dochádza aj k nasávaniu vzduchu. Počas snímania zvuku boli merané hodnoty jednotlivých priestorov takéto: pri chórovom priestore 12,4 °C a v priestore nasávania, teda vo veži kostola 20,6 °C. Tento rozdiel, ako sme uviedli vyššie, je úplne bežný, a teda pre naše merania štandardný. Na snímanie sme si vybrali register Principal 8' a Bourdon 8', kde sme pri rozsahu nástroja C - f<sup>♯</sup> analyzovali všetky tóny c a a. Výber registrov bol cielený, skúmali sme kovový (Principal 8') a drevený (Bourdon 8') register. Snímanie každého tónu trvalo cca 1 min. Takáto dĺžka trvania tónu má význam hlavne pri ladení nástroja, pri praktickej hre sa takéto dlho držané tóny v podstate nevyskytujú. Zároveň sme snímanie zvuku vykonali aj na druhý deň, aby sme zistili, či aj minimálna zmena teploty vplýva na stabilitu a výšku ladenia. Okrem toho sme na záver zosníмали jednotlivé vybrané tóny aj pri zásobovaní organa vzduchom klasickým a pôvodným spôsobom, teda prostredníctvom páky na pôvodnom mechu nástroja. Na snímanie zvuku a na dosiahnutie relevantných a objektívnych výsledkov sme použili nasledovné technické prostriedky a metodiku:

Vybrala sa metóda záznamu digitalizovaného signálu a jeho následná počítačová analýza. Tento postup sme zvolili z dôvodu časovej náročnosti vyhodnocovania jednotlivých zvukových vzoriek signálu. Signál bol zaznamenávaný prostredníctvom hyperkardioidného mikrofónu AT 835 umiestneného na podlahe v pozdĺžnej osi chrámu smerovaného na prospekt organa a vo výške 3 metre. Signál z mikrofónu bol sprá-

<sup>6</sup> Organ sa nachádza v Rímskokatolíckom kostole v obci Muráň. Merania sa uskutočnili v apríli 2012.

covávaný prostredníctvom prenosného mixážneho pultu FP 33 a zaznamenávaný do digitálneho rekordéra TASCAM HDP 2 – vo formáte 16 bit/48 k Hz. Teplota prostredia sa zaznamenávala dataloggermi COMET S3120 a teplomerom TESTO 905-T2. Vzorky signálov boli následne zaznamenané a prepísané do počítača, kde sa vykonala signálová analýza. Signály zodpovedajúce jednotlivým tónom boli najprv podrobené spektrálnej analýze a pre potreby merania bolo potrebné každú vzorku podrobiť filtrácii spektra. Túto filtráciu sme vykonali prostredníctvom digitálneho filtra s veľkou strmou typu pásmový priepust, ktorého stredná frekvencia bola upravovaná na hodnotu zodpovedajúcu základnej frekvencii meraného tónu. Filtráciou sme zo spektra tónu odstránili vyššie harmonické zložky a nežiaduce zložky pod základnou frekvenciou, ktoré by inak znemožňovali meranie výšky tónu. Celý priebeh filtrácie bol kontrolovaný na spektrálnom analyzátore. Spracované signály jednotlivých tónov sa následne v analógovej podobe merali prostredníctvom čítača MASTECH MS 6100. Pre zabezpečenie maximálnej presnosti sa meranie realizovalo prostredníctvom merania periódy signálu a frekvencia sa vypočítala na základe elementárnych vzťahov, ktorými sú viazané perióda a frekvencia signálu.

## Analýza

Meranie sa uskutočnilo v dvoch po sebe nasledujúcich dňoch, prvé meranie v poľudňajších hodinách a druhé meranie v skorých ranných hodinách, čím sme zabezpečili rozdielne exteriérové podmienky. Pre teplotu nasávaného vzduchu to znamenalo rozdiel cca 7 °C pri prakticky rovnakej teplote interiéru kostola cca 12 °C (Tabuľka 1, 2, 3, 4)<sup>7</sup>. Na základe tohto merania môžeme konštatovať, že ak došlo k zmene základnej frekvencie tónu, uskutočnila sa ako skoková zmena, pričom po uplynutí určitého časového úseku sa frekvencia vrátila na svoju pôvodnú hodnotu (periódy T1, T2 a T3). Celkovo možno konštatovať, že maximálna takto vzniknutá odchýlka po prepočítaní nepresiahla u žiadnej z meraných frekvencií hodnotu 4 centov. Rovnako je dôležité, že sa tak deje rovnako pri kovovom, ako aj pri drevenom registri.

Hodnoty prvého dňa sme porovnali s výsledkami merania z druhého dňa pri zmenených klimatických podmienkach a rovnako aj pri zmene spôsobu zásobovania organa vzduchom prostredníctvom kalkanta. Napriek zmenám podmienok môžeme konštatovať, že k žiadnemu relevantnému posunu frekvencie nedošlo. Z tohto experimentu teda jednoznačne vyplýva, že pri zásobovaní organa vzduchom z iného priestoru, ktorý vykazuje iné teplotné hodnoty, nedochádza k rozladeniu organa, ale konštatujeme, že ladenie je za bežných teplotných podmienok stabilné a najpodstatnejší fakt vyplývajúci z merania je, že krátkodobá zmena frekvencie je dejom vratným, to znamená, že po krátkodobej zmene sa vracia na svoju pôvodnú hodnotu. Ak sa jednotlivé frekvencie tónov v registroch od seba odlišujú, je to spôsobené rozladením registrov voči sebe.

Vyššie uvedený výsledok sme kvôli rôznym možným pochybnostiam o tom, či nedochádza k nestabilite pri extrémnejších podmienkach, a teda vyšších teplotných

<sup>7</sup> Tabuľky predstavujú sumár výsledkov nameraných v rôznych podmienkach: Hodnoty T1, T2 a T3 reprezentujú namerané údaje v miernych odchýlkach, ktoré sa správajú ako jav vratný, preto tieto rozdiely vnímame ako intonačnú nestabilitu jednotlivých tónov.

Tabuľka 1

Muráň, 27. 4. 2012 – Principal 8'

|                            |                       |                   |
|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| C (65,4064Hz)              | T1=15 384,615 $\mu$ S | f1=65,000001 Hz   |
|                            | T2=15 151,515 $\mu$ S | f2=66,0000006 Hz  |
| A (110Hz)                  | T1= 9174,312 $\mu$ S  | f1=108,999999 Hz  |
|                            | T2= 9090,909 $\mu$ S  | f2=110,000001 Hz  |
| c (130,813Hz)              | T1= 7692,308 $\mu$ S  | f1=129,99999 Hz   |
|                            |                       |                   |
| a (220Hz)                  | T1= 4566,210 $\mu$ S  | f1=219,000002 Hz  |
|                            | T2= 4587,156 $\mu$ S  | f2=217,999998 Hz  |
| c <sup>1</sup> (261,626Hz) | T1= 3861,004 $\mu$ S  | f1=258,999990 Hz  |
|                            | T2= 3846,154 $\mu$ S  | f2=259,999989 Hz  |
| a <sup>1</sup> (440Hz)     | T1= 2288,330 $\mu$ S  | f1=436,999908 Hz  |
|                            | T2= 2293,578 $\mu$ S  | f2=435,999996 Hz  |
| c <sup>2</sup> (523,251Hz) | T1= 1926,782 $\mu$ S  | f1=519,000073 Hz  |
|                            | T2= 1930,502 $\mu$ S  | f2=517,999981 Hz  |
| a <sup>2</sup> (880Hz)     | T1= 1146,789 $\mu$ S  | f1=871,999993 Hz  |
|                            | T2= 1148,106 $\mu$ S  | f2=870,999716 Hz  |
|                            | T3= 1145,475 $\mu$ S  | f3=873,000283 Hz  |
| c <sup>3</sup> (1046,50Hz) | T1= 962,464 $\mu$ S   | f1=1038,999900 Hz |
|                            | T2= 963,391 $\mu$ S   | f2=1038,000147 Hz |

Tabuľka 2

Muráň 27. 4. 2012 – Bourdon 8'

|                            |                         |                    |  |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|--|
| C (65,4064Hz)              | T1 = 15 384,615 $\mu$ S | f1 = 65,000001 Hz  |  |
|                            | T2 = 15 151,515 $\mu$ S | f2 = 66,0000006 Hz |  |
| A (110Hz)                  | T1 = 9174,312 $\mu$ S   | f1 = 108,999999 Hz |  |
|                            | T2 = 9259,259 $\mu$ S   | f2 = 108,000003 Hz |  |
|                            | T3' = 9090,909          | f3 = 110,000001 Hz |  |
| e (164,814)                | T1 = 6097,561 $\mu$ S   | f1 = 163,999999 Hz |  |
|                            | T2 = 6060,606 $\mu$ S   | f2 = 165,000001 Hz |  |
| a (220Hz)                  | T1 = 4566,210 $\mu$ S   | f1 = 219,000021 Hz |  |
|                            | T2 = 4587,156 $\mu$ S   | f2 = 217,999998 Hz |  |
| c <sup>1</sup> (261,626Hz) | T1 = 3861,004 $\mu$ S   | f1 = 258,999990 Hz |  |
|                            | T2 = 3846,154 $\mu$ S   | f2 = 259,999989 Hz |  |
|                            | T3 = 3875,969 $\mu$ S   | f3 = 257,999999 Hz |  |
| a <sup>1</sup> (440Hz)     | T1 = 2277,904 $\mu$ S   | f1 = 439,000063 Hz |  |
|                            | T2 = 2272,727 $\mu$ S   | f2 = 440,000052 Hz |  |

|                   |                       |                     |                      |
|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| $c^2$ (523,251Hz) | T1 = 1956,947 $\mu$ S | f1 = 511,000042 Hz  |                      |
|                   | T2 = 1960,784 $\mu$ S | f2 = 510,000081 Hz  |                      |
|                   |                       |                     |                      |
| $a^2$ (880Hz)     | T1 = 1146,789 $\mu$ S | f1 = 871,999993 Hz  | nestabilná amplitúda |
|                   | T2 = 1148,106 $\mu$ S | f2 = 870,999716 Hz  |                      |
|                   | T3 = 1145,475 $\mu$ S | f3 = 873,000283 Hz  |                      |
|                   |                       |                     |                      |
| $c^3$ (1046,50Hz) | T1 = 972,763 $\mu$ S  | f1 = 1027,999625 Hz | nestabilná amplitúda |
|                   | T2 = 971,817 $\mu$ S  | f2 = 1029,000315 Hz |                      |
|                   | T3 = 973,710 $\mu$ S  | f3 = 1026,999825 Hz |                      |

**Tabuľka 3**  
Muráň, 28. 4. 2012 – Principal 8'

|                   |                         |                     |                      |
|-------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
| $C$ (65,4064Hz)   | T1 = 15 151,515 $\mu$ S | f1 = 66,0000006 Hz  |                      |
|                   | T2 = 15 384,615 $\mu$ S | f2 = 65,000001 Hz   |                      |
|                   | T3 = 14 925,373 $\mu$ S | f3 = 67,000000 Hz   |                      |
|                   |                         |                     |                      |
| $c$ (130,813Hz)   | T1 = 7692,308 $\mu$ S   | f1 = 129,99999 Hz   |                      |
|                   | T2 = 7633,588 $\mu$ S   | f2 = 130,999996 Hz  |                      |
|                   |                         |                     |                      |
| $c^1$ (261,626Hz) | T1 = 3861,004 $\mu$ S   | f1 = 258,999990 Hz  |                      |
|                   | T2 = 3846,154 $\mu$ S   | f2 = 259,999989 Hz  |                      |
|                   | T3 = 3831,418 $\mu$ S   | f3 = 260,999974 Hz  |                      |
|                   |                         |                     |                      |
| $a^1$ (440Hz)     | T1 = 2277,904 $\mu$ S   | f1 = 439,000063 Hz  |                      |
|                   | T2 = 2272,727 $\mu$ S   | f2 = 440,000052 Hz  |                      |
|                   | T3 = 2283,105 $\mu$ S   | f3 = 438,000004 Hz  |                      |
|                   |                         |                     |                      |
| $c^2$ (523,251Hz) | T1 = 1926,782 $\mu$ S   | f1 = 519,000073 Hz  | nestabilná amplitúda |
|                   | T2 = 1930,502 $\mu$ S   | f2 = 517,999981 Hz  |                      |
|                   | T3 = 1923,077 $\mu$ S   | f3 = 519,999979 Hz  |                      |
|                   |                         |                     |                      |
| $c^3$ (1046,50Hz) | T1 = 962,464 $\mu$ S    | f1 = 1038,999900 Hz | nestabilná amplitúda |
|                   | T2 = 961,538 $\mu$ S    | f2 = 1040,000499 Hz |                      |

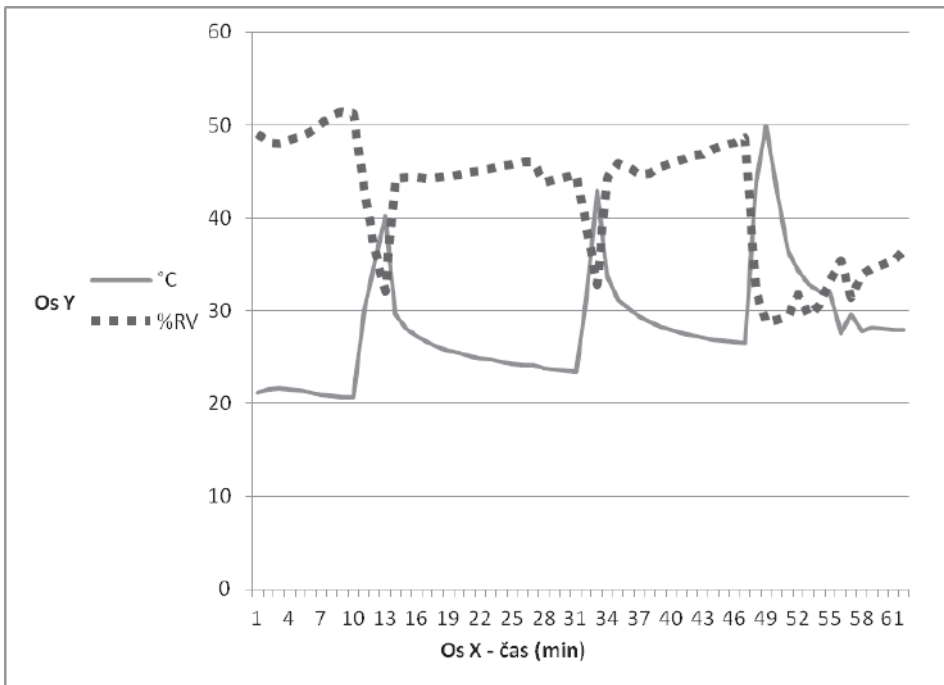
**Tabuľka 4**  
Muráň, 28. 4. 2012 – Principal 8' (nožný pohon)

|                   |                         |                    |
|-------------------|-------------------------|--------------------|
| $C$ (65,4064Hz)   | T1 = 15 384,615 $\mu$ S | f1 = 65,000001 Hz  |
|                   | T2 = 15 151,515 $\mu$ S | f2 = 66,0000006 Hz |
|                   |                         |                    |
| $A$ (110Hz)       | T1 = 9177,312 $\mu$ S   | f1 = 108,964367 Hz |
|                   | T2 = 9090,909 $\mu$ S   | f2 = 110,000001 Hz |
|                   |                         |                    |
| $c$ (130,813Hz)   | T1 = 7692,308 $\mu$ S   | f1 = 129,99999 Hz  |
|                   | T2 = 7575,758 $\mu$ S   | f2 = 131,999992 Hz |
|                   |                         |                    |
| $a$ (220Hz)       | T1 = 4566,210 $\mu$ S   | f1 = 219,000021 Hz |
|                   | T2 = 4545,455 $\mu$ S   | f2 = 219,999978 Hz |
|                   |                         |                    |
| $c^1$ (261,626Hz) | T1 = 3861,004 $\mu$ S   | f1 = 258,999990 Hz |



|                                  |                       |                     |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|
|                                  | T2 = 3846,154 $\mu$ S | f2 = 259,999989 Hz  |
|                                  | T3 = 3831,418 $\mu$ S | f3 = 260,999974 Hz  |
| <b>a<sup>1</sup> (440Hz)</b>     | T1 = 2288,330 $\mu$ S | f1 = 436,999908 Hz  |
|                                  | T2 = 2283,105 $\mu$ S | f2 = 438,000004 Hz  |
| <b>c<sup>2</sup> (523,251Hz)</b> | T1 = 1926,782 $\mu$ S | f1 = 519,000073 Hz  |
|                                  | T2 = 1930,502 $\mu$ S | f2 = 517,999981 Hz  |
|                                  | T3 = 1923,077 $\mu$ S | f3 = 519,999979 Hz  |
| <b>a<sup>2</sup> (880Hz)</b>     | T1 = 1145,475 $\mu$ S | f1 = 873,000283 Hz  |
|                                  | T2 = 1144,165 $\mu$ S | f2 = 873,999816 Hz  |
| <b>c<sup>3</sup> (1046,50Hz)</b> | T1 = 962,464 $\mu$ S  | f1 = 1038,999900 Hz |
|                                  | T2 = 961,538 $\mu$ S  | f2 = 1040,000499 Hz |
|                                  | T3 = 960,615 $\mu$ S  | f3 = 1040,999776 Hz |

rozdieloch, overili aj pomocou ďalšieho experimentu. Pri tomto pokuse sme zvýšili teplotu zásobovacieho vzduchu na rozdiel cca 30 °C oproti teplote priestoru organa, ktorá bola meraná na hodnote 21,3 °C. Merania sme realizovali pre jeden tón *a<sup>1</sup>* pri registri Principal 4', pričom sme v priebehu trvania tónu dodávali vzduch s rôznou teplotou. Napriek extrémnosti rozsahu teploty, ktorá sa pohybovala približne v rozsahu od 20 °C do 50 °C a bola zároveň v prerušovanom zásobovaní (Graf č. 1),



Graf 1: Vývoj teploty a relatívnej vlhkosti kostola počas snímania zvuku

nespôsobila počas celej doby trvania tónu nestabilitu jeho frekvencie, ktorá sa udržala stabilne na úrovni 946,004/947,001 Hz (tón  $a^1$  pri registri Principal 4' a pri vyššom ladení o jeden poltón, teda cca 475 Hz), respektíve 1057,082/1055,966  $\mu$ S. Rozdiel týchto frekvencií je minimálny, cca 1 Hz, a ide o dej vratný, takže uvádzaný rozdiel pripisujeme iba intonačnej nestabilite. Na základe tejto skutočnosti sa dá konštatovať, že stabilita ladenia nezávisí od nasávanej teploty, pretože teplota vzduchu vo vnútri vzduchového systému orgána podlieha komplikovaným fyzikálnym procesom, ktoré môžu ovplyvniť jej veľkosť.

## Diskusia

Výsledky meraní, ako aj historický prierez používania a umiestňovania vzduchového systému exaktne preukázali, že rôzna teplota nasávaného vzduchu do nástroja nemá vplyv na stabilitu ladenia. Práve z empirickej skúsenosti vychádzali aj starí majstri, ktorí spôsob stavby mechov mimo priestoru chóru bežne používali. V tejto súvislosti môžeme povedať, že najzásadnejší podiel na stabilite ladenia má mech a jeho tlak, ktorému podrobuje nasávaný vzduch. Pri každom nástroji je daný tlak iný, ale stále sa pohybuje v hodnote cca 50 – 120 mm H<sub>2</sub>O, čo zodpovedá hodnotám od cca 490 Pa – 1176 Pa, pričom 1 mm H<sub>2</sub>O = 9,8 Pa. Tento jav sa nám potvrdil pri porovnaní výsledkov, keď bol vzduch nasávaný pomocou motorového ventilátora z priestoru veže s klasickým nasávaním pomocou páky na pôvodnom mechu. Hodnoty frekvencie, resp. periódy signálu boli zhodné, čo znamená, že pri nasávaní nemusíme brať do úvahy teplotu nasávaného vzduchu, trenie vo vzduchovode či zmenu teploty priestoru pri prechode vzduchovodu do inej časti kostola. Samozrejme, že isté zmeny teploty nastávajú aj v spomínaných častiach, čo bude určite zaujímavým predmetom ďalšieho výskumu, avšak pre súčasný výstup a ozrejenie skúmaného javu je podstatný vplyv tlaku v mechu nástroja.

Pri posudzovaní veľkosti tlaku vzduchu v systéme nástroja je potrebné brať do úvahy stavové veličiny a termodynamické teórie, pomocou ktorých vieme ozrejmiť náš jav. Pri danom vzťahu berieme do úvahy nie otvorený, ale uzavretý vzduchový systém, pretože, ako sme už ukázali, otvorenosť systému v tomto zmysle nie je relevantná. Tým pádom chápeme mech nástroja a následný vzduchovod, vzdušnicu a píšťalnicu ako uzavretú nádobu so stálym tlakom a objemom. V tejto súvislosti je teda jasné, že mechy orgánov sú objemovo dimenzované tak, že tlak v mechu za veľmi krátke čas ohreje vzduch na určitú teplotu. Následne sa do ventilovej komory dostáva už teplotne stabilizovaný vzduch, ktorý je ďalej distribuovaný. V závere vzduchového systému sa vzduch dostane do píšťalnice, kde je vyvedený úzkym otvorom do jednotlivých píšťal. Túto skutočnosť vieme popísať prostredníctvom adiabatickej expanzie. Pri tomto jave dôjde k okamžitému ochladeniu vzduchu, ktorý sa tak teplotne dostane pod úroveň okolitej teploty. Práve z týchto príčin je fúkaný stlačený vzduch v píšťalách chladnejší ako okolitá teplota, ktorá stúpa a klesá podľa atmosférických podmienok, alebo aj vplyvom človeka, ktorý vo väčšom množstve ohrieva vlastným telesným teplom sakrálny priestor. Adiabatická expanzia teda funguje na báze okamžitého poklesu tlaku, zväčšenia objemu a náhleho ochladenia a to za podmienky, že sa tak udeje rýchlo, bez možnosti vzájomného odovzdania tepelnej

energie.<sup>8</sup> Za týchto okolností je fúkaný vzduch chladnejší ako okolitý, a to aj o niekoľko stupňov Celzia.

## Záver

Vzduchový systém organov poskytuje niekoľko možností postavenia voči nástroju, pričom stabilita ladenia nástroja nezávisí od teploty prostredia, v ktorom je postavený vzduchový systém. Pri postavení vzduchového systému mimo priestoru chóru je dôležité dbať aj na mieru prašnosti tohto prostredia, aby nedochádzalo k zanášaniam píšťal prachom. V takomto prípade by z dlhodobého hľadiska dochádzalo k poškodzovaniu funkčnosti píšťal nástroja. Problematika, ktorá bola predmetom danej štúdie, má tak širší záber, pričom je potrebné jednotlivé poznatky neustále overovať a skúmať. Môžeme tak prispieť k skúmaniu a záchrane historických organov. Na základe týchto poznatkov je dôležité skonštatovať, že pri reštaurovaní historických organov by sa nemal prestavovať vzduchový systém, pretože dochádza k zásahu do historicity a podstaty nástrojov ako predmetov kultúrneho dedičstva. Každý zásah do vzduchového systému nástroja je potrebné dôsledne zvažovať. Na druhej strane, motor do podstaty nástroja nepatrí, preto je jeho prípadná výmena možná. Za iných okolností dochádza v podstate k poškodzovaniu historických nástrojov, čo si určite nevieme predstaviť napríklad už pri spomínaných organoch Martina Šaška. Rovnako výrazne šetríme financie vlastníka, ktoré môže investovať do kvalitnejšieho reštaurovania nástroja.

---

<sup>8</sup> GAJTANSKÁ, Milada – DANIHELOVÁ, Anna – NĚMEC, Miroslav: *Fyzika*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2007, s. 111. KÚDELČÍK, Jozef – HOCKICKO, Peter: *Základy fyziky*. Žilina : Technická univerzita v Žiline, 2011, s. 190-191.