

THE ACOUSTIC ANALYSIS OF THE BELL

AKUSTICKÁ ANALÝZA ZVONU

Smutný J., Pazdera L., Štukavec M.

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 95, Brno

Abstract: The paper is devoted to the acoustic analysis of a historical bell made in 1772. The paper presents basic measurements of the acoustic-vibrational characteristics of a small bell with subsequent analysis of selected parameters. Methods of analysis in the time, frequency and time-frequency domains were selected for the analysis. The conclusion presents an evaluation of the measurement method and evaluation. It also includes recommendations for further types of measurements and investigations.

Anotace: Příspěvek je věnován akustické analýze historického zvonu vyrobeného v roce 1772. V příspěvku je prezentováno základní měření akusticko-vibračních charakteristik malého zvonu s následnou analýzou vybraných parametrů. K analýze byly vybrány metody analýzy v časové, frekvenční a časově-frekvenční oblasti. Závěr uvádí zhodnocení metody měření a hodnocení. Jeho součástí je také doporučení pro další typy měření a zkoumání.

1. Introduction to the issue

Bell ringing was already used in ancient China and Mesopotamia. Bronze bells were used for centuries due to their high sound quality and resistance to corrosion. These bells became widespread in Europe from the 4th century thanks to the Christian church [1]. Bells announced mass, deaths, prayer times or danger (e.g. fire, war). They also found use in civic life and the secular sphere, e.g. city bells, signalling devices, school bells, etc.

The basic material is a traditional bronze alloy (approx. 78% copper and 22% tin) or so-called bell material. The optimally designed profile of the bell allows for the creation of a rich tone (composed of a fundamental tone and higher harmonics). Bells are produced using the classic process – casting.

Each bell is tuned to a specific, so-called fundamental tone. The sound of a bell, which is perceived externally as one powerful tone, consists of a whole series of overtones arising in different parts of the bell. Their number depends on the size of the bell. The most important are the lower octave, the first, the

1. Úvod do problematiky

Zvonění zvonem se používalo už ve starověké Číně a Mezopotámii. Po staletí se používaly bronzové zvony kvůli jejich vysoké kvalitě zvuku a odolnosti proti korozi. Tyto zvony se ve větším měřítku rozšířily od 4. století také v Evropě díky křesťanské církvi [1]. Zvony ohlašoval mši, úmrtí, čas modlitby nebo nebezpečí (např. požár, válku). Našly i využití v občanském životě a světské sféře, např. městské zvony, signální zařízení, školní zvonky apod.

Základním materiálem je tradiční bronzová slitina (cca 78 % měď a 22 % cín) nebo-li tzv. zvonovina. Optimálně navržený profil zvonu umožňuje vytvoření bohatého tónu (složeného ze základního tónu a vyšších harmonických). Zvony se vyrábějí klasickým postupem – odléváním.

Každý zvon je naladěn na určitý, tzv. základní tón. Hlas zvonu, který je vně vnímán, jako jeden mohutný tón se skládá z celé řady alikvotních tónů, vznikajících v různých částech zvonu. Jejich počet je závislý na velikosti zvonu. Nejdůležitější jsou spodní oktáva, prima, tercie, kvinta a horní oktáva, nazývané prin-

third, the fifth and the upper octave, called the principal series. Their value was historically determined during the bell's approval and is still determined today in the relevant places of the bell by special metal tuning forks. The sound of a bell is determined by its size and construction, the type of rib and the material of the bell. The quality of its sound is influenced by a whole series of factors, such as the heart, its suspension, the swing of the bell, the number and intensity of blows, the dimensions and weight of the head, the correct way of ringing, the location of the bell, the construction of the bell stand, the shape of the bell chamber and others. The reference value for determining the level of tones is the first. The lower octave is approximately half the frequency of the prime. The upper octave is twice the frequency of the prime. The third is in the ratio 6 : 5 to the fundamental frequency. The fifth is in the ratio 3 : 2 to the fundamental frequency. The impact tone, which is produced by the heartbeat, lasts only very briefly [2]. A ringing bell is physically a pendulum, the dynamic effects of which depend on:

- The mass and shape of the bell and the mass and shape of the head
- The overall distribution of mass
- The position of the bell's centre of gravity
- The distance of the bell's centre of gravity from the axis of rotation
- The angle of oscillation

The heart of the bell is a pendulum that rings the bell by striking the inside of its rim. The heart and the bell form two interconnected and mutually influencing pendulums. A properly designed heart must strike the widest part of the rim at the top dead centre of the bell, just before its return movement, with its fist, and must maintain the correct ringing rhythm. The heart must be forged using the traditional blacksmithing process from soft steel – its hardness must be less than 130HB – so that the heart wears out more than the bell (the bell material has 180 HB). Designing and being able to make the heart and hanging it in the bell so that it fulfils its function correctly and can ring the bell optimally is an art inherited from generations of bell makers.

Bells can be analysed both through measurement, i.e. experiment, and numerical simulation. The acoustic or vibrational response to the ringing of the bell is often measured as part of the experiment.

cipálová řada. Jejich hodnota se při kolaudaci zvonu historicky určovala a dodnes určuje v příslušných místech zvonu speciálními kovovými ladičkami. Zvuk zvonu je určen jeho velikostí a konstrukcí, typem žebra a materiálem zvonu. Kvalitu jeho hlasu ovlivňuje celá řada faktorů, jako srdce, jeho zavěšení, výkyv zvonu, počet a intenzita úderů, rozměry a hmotnost hlavy, správný způsob zvonění, umístění zvonu, konstrukce zvonová stolice, tvar zvonové komory a další. Referenční hodnotou pro stanovení úrovně tónů je prima. Spodní oktáva má přibližně poloviční hodnotu frekvence primy. Horní oktáva má hodnotu dvojnásobku primy. Tercie je v poměru 6 : 5 k základní frekvenci. Kvinta je v poměru 3 : 2 k základní frekvenci. Nárazový tón, který vzniká při úderu srdce, trvá jen velmi krátce [2]. Zvonící zvon je fyzikálně kyvadlem, jehož dynamické účinky jsou závislé na:

- hmotnosti a tvaru zvonu a hmotnosti a tvaru hlavy
- celkovém rozdělení hmoty
- poloze těžiště zvonu
- vzdálenosti těžiště zvonu od osy otáčení
- úhlu výkyvu

Srdce zvonu je kyvadlo, které rozeznívá zvon úderem do vnitřní strany jeho věnce. Srdce a zvon tvoří dvě propojená a vzájemně se ovlivňující kyvadla. Správně navržené srdce musí udeřit svojí pěstí do nejširší části věnce v horní úvrati zvonu, těsně před jeho zpětným pohybem a musí držet správný rytmus zvonění. Srdce musí být vykováno tradičním kovářským postupem z měkké oceli – jeho tvrdost musí být menší než 130HB – tak aby se opotřebovávalo srdce víc, než zvon (zvonovina má 180 HB). Navrhnout a umět vyrobít srdce a zavěsit jej do zvonu tak, aby plnilo správně svou funkci a dokázalo zvon optimálně rozeznít je uměním, děděným generacemi zvonařů.

Zvony je možné analyzovat jak prostřednictvím měření, tedy experimentu, tak numerickou simulací. V rámci experimentu se často měří akustická nebo vibrační odezva na buzení zvonu.

Velmi specifickým typem zvonu je tzv. „umíráček“ [3]. Jde o tradiční označení pro zvukový signál, kterým se ohlašuje úmrtí osoby. Tento zvon, případně zvonění, má v evropské (zejména křesťanské) kultuře hlubokou symboliku a funkci. Oznamuje smrt

A very specific type of bell is the so-called "death bell" [3]. It is a traditional designation for a sound signal that announces the death of a person. This bell, or rather the ringing, has a deep symbolism and function in European (especially Christian) culture. It announces the death of a person, traditionally a resident of a parish or village. It alerts those around it to the time of death and reminds them of the finiteness of human life. It is a symbol of respect, farewell and spiritual accompaniment of the deceased. In the past, it also served as a call to prayer for the soul of the deceased. It is typically a small to medium-sized bell, often placed separately from other types of bells in a vestibule, tower or chapel [4]. Bells of this type have a deeper and quieter tone than large ceremonial bells. It is tuned low, sometimes with a disharmonious character that evokes sadness. It is often marked or dedicated, or bears an inscription associated with death or prayer.

These types of bells are rung manually or mechanically, usually without rocking, just by the swaying of the heart.

2. Description of the measured bell

The bell in question (Fig. 1) comes from an unknown place in the border region, after the Second World War it ended up in the cemetery bell tower in Šlapanice near Brno. In the past, it was probably precisely crafted, but inappropriately modified from a campanological point of view after the destruction of the bell crown. It is a Baroque death knell bell from 1772 by the Znojmo bellmaker J. G. Scheichel, who came from a well-known Viennese bell-making family. His bells have been preserved in the Louka monastery near Znojmo, in the monastery in Klášterní Hradisko, in the castle chapel in Bítov, in a number of churches in the Znojmo region, but also in Slavonice and Polná. His last dated work dates from 1790. Scheichel's bells are characterized by a beautiful sound and precise workmanship, and are ranked among the most beautiful Baroque bells in our country.

člověka, tradičně obyvatele farnosti nebo obce. Upozorňuje okolí na čas úmrtí a připomíná konečnost lidského života. Je symbolem úcty, rozloučení a duchovního doprovázení zemřelého. V minulosti sloužil také jako výzva k modlitbě za duši zesnulého. Jde typicky o malý až střední zvon, často umístěný odděleně od jiných typů zvonů v předsíni, věži nebo kapli [4]. Zvony tohoto typu mají hlubší a tišší tón než velké slavnostní zvony. Bývá laděn nízko, někdy s disharmonickým charakterem, který evokuje smutek. Často bývá označený nebo dedikovaný neboli nese nápis spojený se smrtí nebo modlitbou.

U těchto typů zvonu se zvoní ručně nebo mechanicky, zpravidla bez kolébání, pouze rozkvyem srdce.

2. Popis měřeného zvonu

Předmětný zvon (Obr. 1) pochází z neznámého místa v pohraničí, po druhé světové válce se dostal do hřbitovní zvonice ve Šlapanicích u Brna. V minulosti byl zřejmě po destrukci zvonové koruny řemeslně precizně, ale z campanologického hlediska nevhodně upraven. Jedná se o barokní zvon umíráček z roku 1772 od znojemského zvonaře J. G. Scheichela pocházejícího ze známé vídeňské zvonařské rodiny. Jeho zvony se zachovaly v klášteře Louka u Znojma, v klášteře v Klášterním Hradisku, v hradní kapli na Bítově, v řadě kostelů na Znojemsku ale i ve Slavonicích a Polné. Poslední jeho datovaná práce pochází z r. 1790. Scheichelovy zvony se vyznačují krásným zvukem a precizním provedením, a jsou řazeny mezi nejhezčí barokní zvony u nás.



Fig. 1 View of the measured bell *Obr. 1 Pohled na měřený zvon*

3. Description of measurement methods and evaluation of selected parameters

The measurement of dynamic-acoustic parameters was carried out in the test hall of the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. The measured bell was hung on a crane hook (Fig. 2). A rubber pad was placed on the floor under the bell. For the experimental investigation of the dynamic properties of the bell, a method based on measuring the response to mechanical shock was used [5]. It should be noted that the mechanical shock was excited both by the heart of the bell and by a special hammer, which has a built-in force sensor, on the lower edge of the bell. In both cases, the acoustic and vibration response were measured. Since the measurement results were used to calibrate the mathematical model and simulate the dynamic response of the bell, the response to mechanical shock was measured with 5 microphones and two accelerometers. The microphones were mounted in the following positions:

- Mic1 – 30cm from the bottom edge of the bell, in the direction of excitation
- Mic2 – 100cm from the bottom edge of the bell, in the direction of excitation
- Mic3 – 30cm from the bottom edge of the bell, perpendicular to the direction of excitation
- Mic4 – 100cm from the bottom edge of the

3. Popis metod měření a hodnocení vybraných parametrů

Měření dynamicko-akustických parametrů proběhlo ve zkušební hale fakulty stavební VUT v Brně. Měřený zvon byl zavěšen na háku jeřábu (Obr. 2). Na podlaze pod zvonem byla umístěna pryžová podložka. Pro experimentální vyšetřování dynamických vlastností zvonu byla použita metoda založená na měření odezvy na mechanický ráz [5]. Podotkněme, že mechanický ráz byl vybuzen jak srdcem zvonu, tak i speciálním kladívkem, které má v sobě zakomponovaný snímač síly, na spodní okraj zvonu. V obou případech byla měřena akustická a vibrační odezva. Vzhledem k tomu, že výsledky měření byly použity ke kalibraci matematického modelu a simulace dynamické odezvy zvonu, odezva na mechanický ráz byla měřena 5 mikrofony a dvěma akcelerometry. Mikrofony byly uchyceny v polohách:

- Mic1 – 30cm od spodní hrany zvonu, ve směru buzení
- Mic2 – 100 cm od spodní hrany zvonu, ve směru buzení
- Mic3 – 30cm od spodní hrany zvonu, kolmo na směr buzení
- Mic4 – 100 cm od spodní hrany zvonu, kolmo na směr buzení
- Mic5 – na zemi proti zvonu ve výšce 0.6 m pod spodní hranou zvonu

bell, perpendicular to the direction of excitation

- Mic5 – on the ground opposite the bell at a height of 0.6m below the bottom edge of the bell

The accelerometers were mounted as follows. Accelerometer Acc1 was mounted in a plane perpendicular to the direction of excitation, at the bottom of the wreath, accelerometer Acc2 in a plane perpendicular to the direction of excitation, in the middle of the bell between the decoration and the head of the Virgin Mary. The Pulse measuring center and BK Connect measuring software from Bruel&Kjaer were used for the measurements. For further analyses, an acoustic camera was also used (Fig. 3). FlexPro software was used to analyze the measured data.

Akcelerometry bylo uchyceny takto. Akcelerometr Acc1 byl uchycen v rovině kolmé na směr buzení, dole na spodní hraně věnce, akcelerometr Acc2 pak v rovině kolmé na směr buzení, uprostřed zvonu mezi zdobením a hlavou panny Marie. K měření byla využita měřicí ústředna Pulse a měřicí software BK Connect od společnosti Bruel&Kjaer. Z důvodu dalších analýz byla použita i akustická kamera (Obr. 3). K analýze naměřených dat byl použit software FlexPro.



Fig. 2 View of the measurement site

Obr. 2 Pohled na místo měření

It should be noted that for the presentation in this paper, measured signals from all

Podotkněme, že pro prezentaci v tomto příspěvku byly použity naměřené signály ze

five microphones when the bell was excited by a heartbeat were used. For the needs of a more detailed analysis of vibration phenomena, signals obtained from accelerometers when excited by a modal hammer were used. In this case, frequency transfer functions were calculated from the response signals for the purpose of normalization to the excitation signal. These were recalculated by inverse Fourier transformation into the time plane. In this way, normalized time courses of acoustic pressure and acceleration of oscillation were obtained.

všech pěti mikrofónů při buzení zvonu rázem srdce. Pro potřeby podrobnější analýzy vibračních jevů byly použity signály získané z akcelerometrů při buzení modálním kladívkem. V tomto případě byly z odezvových signálů vypočteny frekvenční přenosové funkce z důvodu normalizace na budící signál. Tyto byly zpětně přepočteny inverzní Fourierovou transformací do časové roviny. Takto byl získán normované časové průběhy akustického tlaku i zrychlení kmitání.

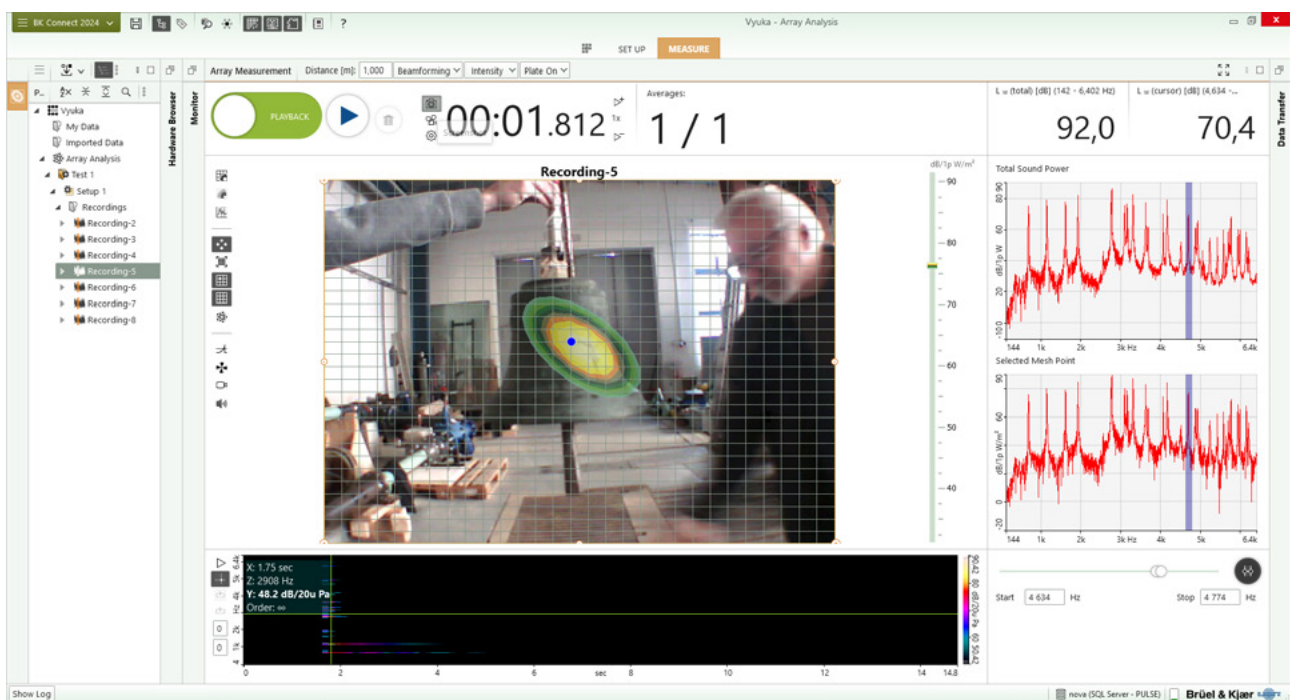


Fig. 3 Analysis within the acoustic camera

Obr. 3 Analýza v rámci akustické kamery

4. Evaluation of measured data

To evaluate the measured data from the microphones, an analysis of the measured data in the time and frequency domain was used. This analysis includes a picture including the time responses of the acoustic pressure measured on all five microphones and their frequency spectra (Fig. 4). A Fourier transform was designed for the analysis in the frequency plane. By comparing the time courses, it can be seen that higher acoustic pressure values were achieved on the closer microphones compared to the microphones locat-

4. Hodnocení naměřených dat

K hodnocení naměřených dat z mikrofónů byla použita analýza v časové a frekvenční oblasti. Součástí této analýzy je obrázek zahrnující časové odezvy akustického tlaku naměřené na všech pěti mikrofónech a jejich frekvenční spektra (Obr. 4). Pro analýzu ve frekvenční rovině byla navržena Fourierova transformace. Porovnáním lze zjistit z časových průběhů, že na bližších mikrofónech bylo dosaženo vyšších hodnot akustického tlaku oproti mikrofónům umístěným ve vzdálenější poloze. Útlum je zpočátku výrazný, pak následuje pozvolné

ed in a more distant position. The attenuation is initially significant, then a gradual decay follows. From the comparison of the frequency spectra calculated, it can be stated that for microphones Mic1 to Mic4 they are essentially comparable. The key frequency components occur here at frequencies of 685 Hz, 1145 Hz, 1620 Hz, 2780 Hz, 3310 Hz and 3630 Hz. For the microphone placed at the bottom of the bell, the frequency spectrum is slightly different, especially in terms of the height of the individual frequency components.

To evaluate the data from the accelerometers, data analysis in the time, frequency and time-frequency domains was used. For the analysis in the frequency plane, the Fourier transform was again used.

For the analysis in the time-frequency plane, a procedure based on the application of the short-term Fourier transform was used. For the time-frequency analysis, images were created that consist of three graphs (Fig. 5). The upper graph shows the time course of the instantaneous value of the vibration acceleration from the Acc2 sensor. In particular, global extremes and attenuation within the entire signal with time are visible. The left graph shows the amplitude spectrum of the vibration response depending on the frequency calculated by direct application of the Fourier transform to the measured signal. Significant frequency components contained in the entire measured signal are visible here.

The middle graph shows a 3D display of the time-frequency course of the acceleration amplitude spectrum. The dependence of the amplitude spectrum at individual time and frequency moments is shown here, i.e. the time and frequency course are combined. In simple terms, it can be said that time-frequency graphs provide information about how long a given frequency component occurs in the measured signal. The values of the acoustic pressure in the decibel scale are shown in different colours in the middle graphs. Note that the maximum value is black, the lowest is white.

From the upper graph of Fig. 5 it is clear that the maximum acceleration value is almost $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. The expected signal attenuation from these values to values two orders of magnitude lower is around 0.5 s in time.

doznívání. Ze srovnání frekvenčních spekter vypočtených lze konstatovat, že pro mikrofony Mic1 až Mic4 jsou v podstatě srovnatelné. Vyskytují se zde klíčové frekvenční složky na frekvencích 685 Hz, 1145 Hz, 1620 Hz, 2780 Hz, 3310 Hz a 3630 Hz. U mikrofonu umístěném ze spodní části zvonu je frekvenční spektrum mírně odlišné, zejména z hlediska výše hodnot jednotlivých frekvenčních složek.

K hodnocení dat z akcelerometrů byla použita analýza dat v časové, frekvenční a časově frekvenční oblasti. Pro analýzu ve frekvenční rovině byla opět použita Fourierova transformace.

Pro analýzu v časově frekvenční rovině byl použit postup založený na aplikaci krátkodobé Fourierovy transformace. K časově frekvenční analýze byly vytvořeny obrázky, které jsou tvořeny trojicí grafů (Obr. 5). V horním grafu je zobrazen časový průběh okamžité hodnoty zrychlení kmitání ze sensoru Acc2. V něm jsou patrné zejména globální extrémy a útlum v rámci celého signálu s časem. V levém grafu je zobrazeno amplitudové spektrum vibrační odezvy v závislosti na frekvenci vypočítané přímou aplikací Fourierovy transformace na naměřený signál. Zde jsou patrné význačné frekvenční složky obsažené v celém naměřeném signále.

V prostředním grafu je 3D zobrazení časově frekvenčního průběhu amplitudového spektra zrychlení. Je zde zobrazena závislost amplitudového spektra v jednotlivých časových a frekvenčních okamžicích, tj. spojuje se časový a frekvenční průběh. Zjednodušeně je možné říci, že časově frekvenční grafy poskytují informaci o tom, jak dlouho se daná frekvenční složka vyskytuje v naměřeném signále. Hodnoty akustického tlaku v decibellové stupnici jsou znázorněny u prostředních grafů odlišnými barvami. Poznamenejme, že maximální hodnota je barvy černé, nejnižší je pak barvy bílé.

Z horního grafu obr. 5 je patrné, že maximální hodnota zrychlení je téměř $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Předpokládaný útlum signálu z těchto hodnot na hodnoty o dva řády nižší je v čase kolem 0.5 s. V levém grafu Obr. 5 je zobrazeno amplitudové spektrum akustické odezvy vypočítané přímou aplikací Fourierovy transformace na signál naměřený na snímači zrychlení. Ve frekvenčním spektru se vysky-

The left graph of Fig. 5 shows the amplitude spectrum of the acoustic response calculated by directly applying the Fourier transform to the signal measured on the acceleration sensor. Similar key frequency components occur in the frequency spectrum, i.e. components at frequencies of 685 Hz, 1145 Hz, 1620 Hz, 2780 Hz, 3310 Hz and 3630 Hz.

Note that the following table Tab. 1 shows a comparison of the accuracy of tones. The comparison of the accuracy of tones in bells mainly concerns the overtones, which are the tones produced by the sound of the bell, which are integer multiples of the fundamental tone. Accuracy is important for the harmonious and beautiful sounds of bells. Table Tab. 2 then shows an example of an ideal bell.

tují podobné klíčové frekvenční složky, tedy složky na frekvencích 685 Hz, 1145 Hz, 1620 Hz, 2780 Hz, 3310 Hz a 3630 Hz.

Podotkněme, že následující tabulka Tab. 1 ukazuje srovnání přesnosti tónů. Srovnávání přesnosti tónů u zvonů se týká hlavně alikvotních tónů, což jsou tóny vznikající při zvuku zvonu, které jsou celistvými násobky základního tónu. Přesnost je důležitá pro harmonické a krásné zvuky zvonů. Tabulka Tab. 2 pak ukazuje příklad ideálního zvonu.

Freequency (Hz)	Closest tone	Octave	Accuracy in cents	Ratio 685 Hz	Theoretical tone
Frekvence (Hz)	Nejbližší tón	Oktáva	Přesnost (v centech)	Poměr k 685 Hz	Teoretický tón
685 Hz	F5	5	+14 cents/centů	1,00×	Strike tone / Prime
1145 Hz	C6	6	-5 cents/centů	1,67×	Tierce (malá tercie ≈ 1.6)
1620 Hz	E6	6	-13 cents/centů	2,36×	~ kvinta plus tercie
2780 Hz	A#7 / Bb7	7	-12 cents/centů	4,06×	Between two octaves mezi dvěma oktávami ($\approx 4\times$)
3310 Hz	D8	8	-13 cents/centů	4,83×	Aproximate duodecima přibližně duodecima
3630 Hz	Eb8	8	-4 cents/centy	5,30×	Very high aliquot velmi vysoký alikvót

Tab. 1 Přesnost tónů

Tab. 1 Tone Accuracy

Partial tone Dílčí tón	Ratio Poměr	Calculation Výpočet (Hz)	Note / Poznámka
Hum tone	0.5×	343 Hz	Deep bass / hluboký bas
Strike tone	1×	685 Hz	Main perceived tone / hlavní vnímaný tón
Tierce	1.2×	822 Hz	Minor third (typical of funeral bells) / malá tercie (typická pro smuteční zvony)
Quint	1.5×	1028 Hz	Fift / kvinta
Nominal	2×	1370 Hz	Often the strongest frequency / často nejsilnější frekvence
Superquint	3×	2055 Hz	Ringing brightness / zvonivý jas
Octave nominal	4×	2740 Hz	Trebl / výšky

Tab. 2 Ideal Bell

Note that Cent is a unit for very precise measurement of the difference between two musical tones – specifically, it is the logarithmic division of one semitone (semitone) in equal tempered tuning. 1 semitone is 100 cents, an octave has 12 semitones, i.e. 1200 cents [2].

$$cents = 1200 \times \log_2 \left(\frac{f_{ref}}{f_{mer}} \right), \quad (1)$$

where f_{ref} is the reference value of the tone and f_{mer} is the measured value. The human ear can distinguish differences as small as 6 cents.

Similar conclusions can be drawn from the middle graph in Fig. 5. This graph shows the time-frequency spectrum calculated by applying the short-term Fourier transform to the measured signal. In contrast to the amplitude spectrum in the left graph, there is information here about the temporal occurrence of individual frequency components in time. Note that the longest-occurring component is the frequency 685 Hz. The others are attenuated much earlier.

Tab. 2 Ideální zvon

Poznamenejme, že Cent je jednotka pro velmi přesné měření rozdílu mezi dvěma hudebními tóny – konkrétně jde o logaritmické dělení jednoho půltónu (semitónu) v rovnoměrně temperovaném ladění. 1 půltón je 100 centů, oktáva má 12 půltónů tj. 1200 centů [2].

$$cents = 1200 \times \log_2 \left(\frac{f_{ref}}{f_{mer}} \right), \quad (1)$$

kde f_{ref} je referenční hodnota tónu a f_{mer} je změřená hodnota. Lidské ucho dokáže rozlišit rozdíly už od 6 centů.

Podobné závěry lze konstatovat i u prostředního grafu Obr. 5. Tento graf ukazuje časově frekvenční spektrum vypočtená aplikací krátkodobé Fourierovy transformace na měřený signál. Oproti amplitudovému spektru v levém grafu je zde informace ohledně časového výskytu jednotlivých frekvenčních komponent v čase. Podotkněme, že nejdéle se vyskytující složkou je frekvence 685 Hz. Ostatní jsou utlumeny mnohem dříve.

5. Conclusion

The bell from 1772 by the Znojmo bell-maker Johann Georg Scheichel, located in Šlapanice near Brno, is a typical example of high-quality Baroque bell-making. It was cast from traditional bell material (an alloy of copper and tin), which gives it not only exceptional durability but also a characteristic, rich sound. Acoustic analysis shows that the main perceived tone (strike tone) of the bell is around 685 Hz, and its spectrum contains several distinct overtone frequencies. Some of them correspond to the expected harmonic ratios (e.g. tierce and quint), others are slightly shifted, which is quite common and natural for historical bells. The higher frequencies around 3310 Hz and 3630 Hz do not correspond exactly to harmonic intervals, but contribute to the ringing, clarity and unique timbre of the tone that Baroque bells often have. Overall, it can be said that this bell is not only a valuable cultural monument, but also an acoustically interesting musical instrument, which still bears the sound imprint of the time and craftsmanship of its creator.

Based on the measurements and analyses performed, it can be stated that the mentioned methodology is very well applicable for the analysis of acoustic and dynamic parameters of bells of various types. The methodology is applicable both for laboratory measurements and for measurements in bell towers. It provides the possibility of comparing measured parameters both in the time and frequency domain and in the time-frequency domain. The measured and calculated quantities are characterized by sufficient accuracy and informative ability.

The application of short-term Fourier transform, which provides sufficiently accurate localization of frequency components contained in the measured signals, also significantly contributed to this.

5. Závěr

Zvon z roku 1772 od znojemského zvonaře Johanna Georga Scheichela, umístěný ve Šlapanicích u Brna, představuje typický příklad kvalitního barokního zvonařství. Byl odlit z tradiční zvonoviny (slitiny mědi a cínu), což mu dodává nejen výjimečnou trvanlivost, ale také charakteristický, bohatý zvukový projev. Akustická analýza ukazuje, že hlavní vnímaný tón (strike tone) zvonu je kolem 685 Hz, a jeho spektrum obsahuje několik výrazných alikvótních frekvencí. Některé z nich odpovídají očekávaným harmonickým poměrům (např. tierce a quint), jiné jsou mírně posunuty, což je u historických zvonů zcela běžné a přirozené. Vyšší frekvence kolem 3310 Hz a 3630 Hz neodpovídají přesně harmonickým intervalům, ale přispívají ke zvoničnosti, jasnosti a unikátnímu zabarvení tónu, jaké barokní zvony často mají. Celkově lze říci, že tento zvon je nejen cennou kulturní památkou, ale i akusticky zajímavým hudebním nástrojem, který dodnes nese zvukový otisk doby a řemeslného umění svého tvůrce.

Na základě provedeným měření a analýz je možné konstatovat, že uvedená metodika je velmi dobře použitelná pro analýzu akustických a dynamických parametrů zvonů různého typu. Metodika je použitelná jak pro laboratorní měření, tak pro měření ve zvonících. Poskytuje možnost srovnání měřených parametrů jak v časové a frekvenční, tak v časově frekvenční oblasti. Naměřené i vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností.

K tomu významně také přispěla aplikace krátkodobé Fourierovy transformace, která poskytuje dostatečně přesnou lokalizaci frekvenčních komponent obsažených v měřených signálech.

Akustická odezva zvonu na buzení srdcem / The acoustic response of the bell to tongue stimulation

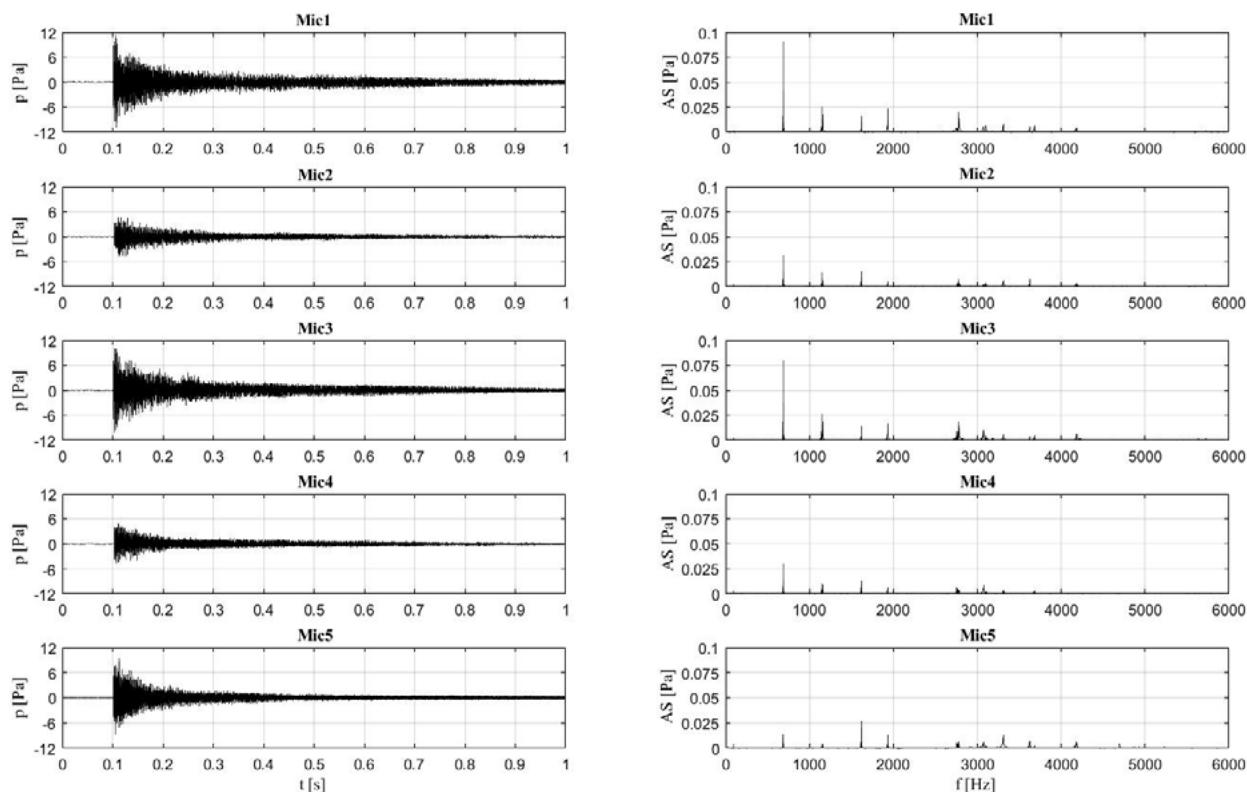


Fig. 4 Outputs from measurement of acoustic response to tongue shock

Obr. 4 Výstupy z měření akustické odezvy na ráz srdcem

The methodology used is also suitable for calibrating mathematical and simulation models of bells. The authors recommend continuing the work that has been started, both in laboratory conditions and in-situ conditions, in bell towers, etc. The authors also recommend a higher level of integration of measurements using an acoustic camera. It will also be very interesting to compile and use a measurement methodology in the form of experimental modal analysis. This could fully replace classical procedures, or possibly supplement numerical simulation. The only drawback of this method is the relatively longer measurement time. In conclusion, we would like to note that the publication of the results of the experimental modal analysis of the bell in question will be presented in another contribution.

Použitá metodika je vhodná také pro kalibraci matematických a simulačních modelů zvonů. Autoři doporučují v započatých pracích pokračovat, a to jak v laboratorních podmínkách, tak v podmínkách in-situ, ve zvonících apod. Rovněž autoři doporučují vyšší míru začlenění měření pomocí akustické kamery. Velmi zajímavé bude také sestavení a použití metodiky měření formou experimentální modální analýzy. Tato by mohla plně nahradit klasické postupy, případně doplnit numerickou simulaci. Jediným nedostatkem této metody je poměrně delší doba měření. Závěrem podotkneme, že zveřejnění výsledků z experimentální modální analýzy předmětného zvonu bude uvedeno v některém dalším příspěvku.

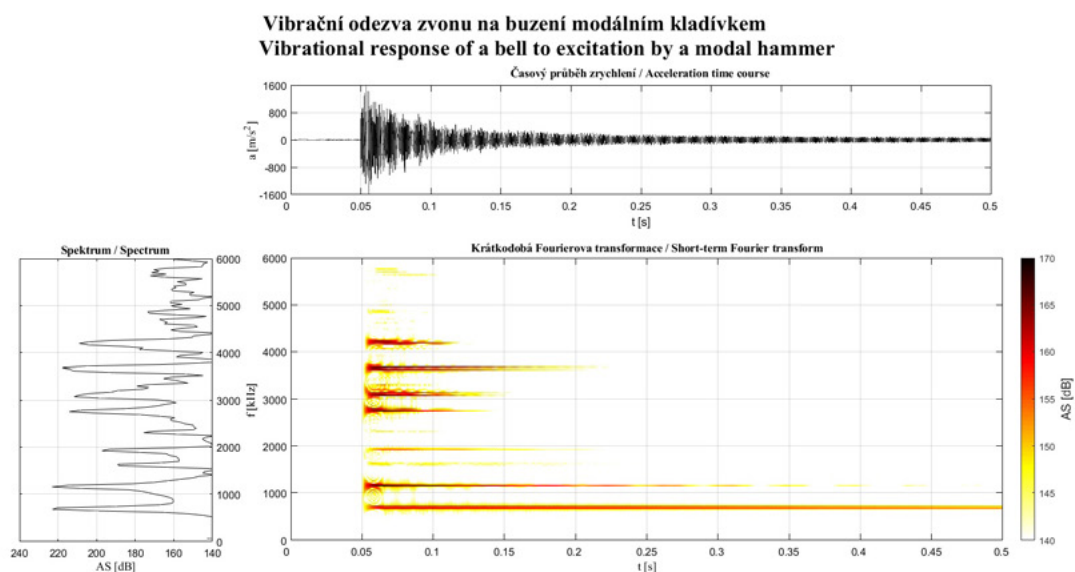


Fig. 5 Time-frequency analysis of the signal from the accelerometer Acc2

Obr. 5 Časově frekvenční analýza signálu z akcelerometru Acc2

6. References/ Použitá literatura

- [1] Thomas D. Rossing: Acoustics of Bells, Publisher: Van Nostrand Reinhold, 1984
- [2] Neville H. Fletcher, Thomas D. Rossing: The Physics of Musical Instruments, Springer, 2008
- [3] Zdeňka Dytrychová: The Bell and Its Voice, Brodek u Prospějova, 2010
- [4] Petr Rudolf Manoušek: Bell Ringing, Cosmopolis, 2006
- [5] Smutný J., Pazdera, L.: Time-frequency analysis of real signals, Brno, Econ publishing, 2003, 195 pp. ISBN: 80-86433-23- 4

Acknowledgements/ Poděkování

This contribution was supported by the project FAST-S-22-8011. Thanks also go to the employees of SVS FEM, Mr. Ing. M. Stárek and Mr. Ing. M. Šebík for lending the bell for the given measurement and for additional information about this bell.

Tento příspěvek byl podpořen projektem FAST-S-22-8011. Poděkování také náleží pracovníkům společnosti SVS FEM panu Ing. M. Stárkovi a panu Ing. M. Šebíkovi za zapůjčení zvonu k danému měření i za doplňující informace o tomto zvonu.



Prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.

He graduated from Technical University of Brno. Since 2009 he is a professor. He is the Member of the Czech Association for Non-Destructive Testing – a professional group for Acoustic Emission and the member of the RS 07 regional group committee. Since 1988, he is on The Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. He is in charge of theoretical exercises and laboratory sessions in Physics. He is conducting research and development in the field of physical phenomenon measurement and measurement automation, with particular focus on the application of computers in measurements and evaluation. His research is focused on the acoustic and vibration areas. He published over 40 papers in foreign periodicals, in the field of engineering source signal measurement and analysis, dealing above all, with nondestructive testing, noise and vibrations.

e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz



Prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

He graduated from the Faculty of Electrical Engineering, TU Brno, specialisation technology of radio and communication devices. He works as a researcher-teacher at the Department of railway constructions and structures. He was graduated Ph.D. at the specialisation Theory of structures (Ph.D. thesis Modern Method of Noise and Vibration Analysis Applied on Railway Structures). College lecturer – 2002 (“Time Frequency Analysis of Constructional Structures and Materials”). 2009 – Professor – Constructions and Transport Structures. He is member of Czech association for geo-information, Czech acoustic society and Time frequency user club. Within the framework of the scientific and research and pedagogical activities he devotes his activities especially to the problems of geographical information systems, the experimental analysis of structures, the analysis of noise and vibrations, the problems of applying the methods of the artificial intelligence in experimental analysis of structures, the modelling of structures etc.

e-mail: smutny.j@fce.vutbr.cz

Milan Štukavec



He graduated from the Faculty of Civil Engineering, TU Brno, specialisation Structural design. He gained his Ph.D. in the specialisation Theory of structures (Ph.D. thesis Mitigating Noise and Vibrations Using Recycled Elastomers). Certified Engineer in the field of Statics and Dynamics of Structures. Court expert in the field of Structural Engineering. A member of the Czech Chamber of Authorized Engineers and Technicians. He has been working as a structural engineer at Manhire Associates, K2 project and ZIPP Brno. Several projects of concrete railway structures with strong interest in experimental analysis and measuring real behaviour and response of the structures.