

Акустика

Acoustics

Sound Field Diffusivity in a Small Reverberation Room

Dejan Ćirić, Kristian Jambrošić, Marko Janković

Abstract—Diffuse sound field is one of the most important prerequisites for various measurements in a reverberation room. Unfortunately, it is rather complex to have such a sound field in the whole frequency range of interest. This is especially valid at low frequencies, and for some rooms of inadequate characteristics like inadequate shape or small volume. Another topic is how to evaluate the diffusivity of the sound field. There is no direct measure to assess this property, instead various indirect descriptors are used for that purpose. This paper deals with assessment of sound field diffusivity of a small reverberation room. Focus is on energy decay curves and their deviation from the target ones. Two indirect descriptors – standard deviation of decay rate and linearity of energy decay curves are used here to investigate the sound field diffusivity. The effects of having diffusers in the room are also considered.

Index Terms—Reverberation room; diffuse sound field; energy decay curve; diffusivity descriptors.

I. INTRODUCTION

REVERBERATION rooms (chambers) are used for various acoustical measurements such as random incidence absorption coefficient of materials, source power level and transmission loss. Although there are other measurement methods, like impedance tube method [1,2], the reverberation room method has been preferred for a number of applications and long continued to be used successfully. Measurement of absorption coefficient in a reverberation room is based on the relation between volume, absorption and sound decay [3]. An important assumption related to this measurement is diffuse sound field present inside the room. Such a sound field is very challenging to be implemented, especially at low frequencies.

It has been reported in various studies that there are significant differences among sound absorption performance data from different laboratories [4]. Several factors are identified for such a large spread of the absorption coefficient results. They include the diffusion conditions in the reverberation room, its volume and shape, type and area of diffusers, the edge-effect, the installation area of the tested sample [4] and the value of sound absorption coefficient.

The lack of a diffuse field is specified as the main reason

Dejan Ćirić is with the University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

Kristian Jambrošić is with the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Unska 3, HR-10000 Zagreb, Croatia (e-mail: Kristian.Jambrosic@fer.hr).

Marko Janković is with the University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia (e-mail: marestudio2004@gmail.com).

for differences in absorption coefficient results in a number of reports [5]. The sound field in a room can be considered to consist of a horizontal and vertical sound field [5]. The vertical field can be strongly damped especially when a highly absorptive sample is placed in the room. On the other hand, the horizontal sound field is much less affected by the absorption. Depending on which sound field is dominant, the measurement results for absorption performance can differ. In case of dominant horizontal sound field, the absorption will be underestimated [5].

One of common discrepancies found in the absorption performance measurement is the absorption coefficient greater than 1. The reasons for this phenomenon include [6]:

- edge diffraction effect (the edge occurs mainly at the lower frequencies from 200-500 Hz [5]),
- non-diffuseness that causes non even time and space distribution of the sound pressure level across the reverberation room,
- Sabine formulation that should not be applied when the mean absorption value is > 0.4 (if this is not satisfied, an overestimation of the absorption can be obtained [5]),
- effect of diffusers (reduction of the mean free path - MFP) is not accounted in the calculation of the absorption.

For quite some time, there has been shown interest in extending the frequency range of the absorption measurement towards low frequencies (below 100 Hz). The main reason why it is difficult to do this is the low modal density at low frequencies [7]. It is worth noting that the room modal behavior depends on the room geometry.

The sound diffusion in a reverberation room and the method to realize diffuse sound field have been topics of a number of investigations so far. However, the relationship between the measurement accuracy of sound absorption coefficient and the sound field in a reverberation room is still an important problem [8]. In addition, quantification of sound field diffusivity (diffuseness) is still on open issue. This is why this paper sheds some light on this matter from a perspective of energy decay curves (EDCs). These curves are used to calculate two descriptors of sound field diffusivity, that is, standard deviation of decay rate and linearity of EDCs. The diffusivity of sound field of a small reverberation room is thus analyzed in third-octave bands by investigating the mentioned descriptors. Besides, the analysis includes the effects of diffusers, too.

II. REVERBERATION ROOM AND ITS ACOUSTICS

Reverberation room design is defined in different standards

[7,9]. Thus, there are specifications related to room dimensions saying that there should be no two dimensions equal to each other, and that the largest dimension should be at least two times greater than the smallest one. Strong preference is given to highly irregular room shapes as they are able to continuously redistribute the energy in all possible directions [10]. Each standard typically prescribes the minimum volume of the room [11]. Then, in order to facilitate the least absorption, the room should be constructed of heavy materials. Diffusers are also mentioned in the standards. Hanging randomly in the room volume, they should increase the sound diffusivity [3].

One of the major assumptions related to the absorption measurements is that the sound field in the reverberation room is diffuse. According to definition, this means that sound field is the same in every point of the room, that is, sound waves are incident from all directions with equal intensity and random phase at any position in the room [1]. In other words, characteristics of the ideal diffuse sound field are spatial uniformity of acoustic energy density and the isotropy of acoustic energy flow everywhere in the sound field [8].

In spite of requirements for achieving diffuse sound field, significant deviations from the target diffuseness have been reported in a number of studies [11]. Thus, it is well-known that in reality the standing waves are present in reverberation rooms, especially at low frequencies, and the sound pressure distribution within the rooms considerably varies from point to point. Several important factors are identified affecting the diffusion state inside the reverberation chamber, among which shape of the chamber and the size of the space stand out [4]. Besides, the sound field diffusivity in the empty chamber and when a specimen with high absorption performance is present could be very different.

A. Effects of Diffusers

Diffusivity of the sound field inside a reverberation room can be improved by placing a certain number of diffusers. These objects scattered over the room's walls and ceiling disrupt acoustic standing waves [1]. Usage of diffusers is also specified in the relevant standards including ISO 354 [9]. Unfortunately, the specification found in ISO 354 is not very precise stating that the diffusion plates shall be installed in the room until there is no further enhancement of the sound absorption performance of the specimen [4,9]. In this standard, more diffusers (more than one) with different sizes are recommended. An adequate diffuser can be a plate of plywood that can be slightly curved, and whose thickness can be only few millimeters and an area between 0.8 and 2 m².

Regarding the total diffuser surface area, different data can be found in the literature, from the recommendation that diffusers should occupy between 15% and 25% of the total surface [4] up to the one saying that total area should be approximately equal to the floor surface [10]. In some of the previous studies, it is shown that addition of diffusers does not necessarily provide an optimal diffuse sound field [4]. It is also found that the quantity of diffusers has little influence on the measured absorption performance below 250 Hz, while its

influence is larger in medium to high frequency range [10].

When diffusers are installed in a reverberation room, reverberation time of the empty room gets smaller [7]. This behavior can be attributed to the reduction of the MFP of the acoustic waves and to the low frequency dissipation of energy [7]. Change of the MFP depends on the type, number and orientation of the diffusers [10]. What can be problematic here is that the formula for the calculation of the equivalent absorption area specified in the standard ISO 354 does not take into account this change of the MFP.

III. DESCRIPTORS OF SOUND FIELD DIFFUSIVITY

There are no direct ways to characterize sound field diffusivity in a reverberation room and consequently there is no direct objective measurement to be used for that purpose [11]. This is why diffusivity of sound field in a reverberation room is evaluated using various indirect descriptors or quantifiers. They include cut-off-frequency, number of modes, spatial uniformity of reverberant sound field, standard deviation of reverberation time, accuracy of measured reverberation time, linearity of EDCs, accuracy of measured absorption coefficient (α_{rev}) and number of peaks of the impulse response [4,5]. Focus here is on standard deviation of reverberation time or decay rate and linearity of EDCs. In addition, cut-off-frequency is briefly explained and calculated for the used reverberation room.

A. Cut-off frequency

A low frequency limit is defined as a tentative criterion for existence of diffuse sound field in a reverberation room. There are two types of definition of the low frequency limit – the first one is related to modal overlap (where overlap factor of 3 is typically applied), while another one is statistically based related to modal count in a given frequency range. The first definition yields the Schroeder's frequency known to be rather restrictive. This frequency should actually represent a transition from modal behavior to uniformly diffuse field. For a room of volume around 220 m³ and reverberation time in the frequency range from 100 Hz to 5 kHz of 11.3 s, it is 454 Hz. From theoretical point of view, the sound field in a reverberation room below the Schroeder frequency is not diffuse. However, it is reported in a number of studies that the sound field is not diffuse enough even well above the Schroeder frequency [10]. According to the second definition of the low frequency limit, this limit typically corresponds to a modal count of 20 in a given frequency band. For a third-octave band, the cut-off limit is obtained as

$$f_c = \frac{343}{\sqrt[3]{V/4}}, \quad (1)$$

where V is the room volume.

B. Standard deviation of reverberation time (decay rate)

Another indicator of the sound field diffusivity is based on the reverberation time (decay rate), actually on standard deviation of the reverberation time according to the

microphone location inside a reverberation chamber. A particular reverberation room is evaluated to have a diffuse sound field if the standard deviation of the measured reverberation time is smaller than the standard deviation of the theoretical reverberation time. The specification of the maximum allowable displacement of the decay rate depending on the location of the microphone is given in the ASTM C 423 standard [12]. The decay rate can be calculated as

$$d_i = \frac{60}{T_i} - m_{iso} c \log(e), \quad (2)$$

where d_i is the decay rate measured at the i -th microphone, T_i is the reverberation time at the i -th position, m_{iso} is the air attenuation coefficient calculated according to ISO 9613-1 [4], c is the speed of sound and e is the base of natural logarithm. The standard deviation of decay rate among the N microphone positions in a third-octave band (S) can be calculated as

$$S = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

where \bar{d} represents the decay rate averaged over all microphone positions. Since the contribution of the second term in (2) - $m_{iso}c \log(e)$ is small, especially after subtraction in (3), the decay rate here is calculated as $60/T_i$. The relative standard deviation of decay rate (S_{rel}) used as the sound field diffusivity indicator is calculated as $S_{rel} = S/\bar{d}$. Better diffusion conditions exist if the relative standard deviation of decay rate has a lower value.

C. Linearity of energy-decay curve

EDCs can also be used as an indicator of sound field diffusivity. It is known that in perfectly diffuse sound field, energy decay versus time on dB scale represents straight line, or, in other words, it represents a linear function. Thus, a measure of nonlinearity of EDC can be used as an indirect quantifier of the sound field diffusivity. Quantification of the curvature of the EDCs can be done by means of a correlation coefficient, r , between the predicted decay curve and the best-fitted straight line [11]. Another option for an effective measure of the curvature (κ) is to magnify the deviation from perfect correlation

$$\kappa = 1000(1 - (r)). \quad (4)$$

IV. INVESTIGATION METHOD

The measurements whose results are given here were carried out within the COST Action 15125, where a round robin experiment related to measured absorption coefficient variability is performed. In that regard, the variability is caused by reverberation room, equipment, signal processing and team doing the measurements. Some details are already given in [13]. What is especially interesting here is that reverberation room of the Faculty of Electronic Engineering

in Niš where the measurements were carried out is rather small – its volume is 65.05 m^3 . The room has an irregular shape, there are no parallel walls, the largest and the smallest dimensions of the floor are 4.08 m and 3.67 m, respectively. The highest point of the ceiling is 4.33 m, while the smallest height is 3.87 m.

In order to improve the room diffusivity, there are 5 diffusers of the area from 0.8 m^2 to 2 m^2 , hanging from the ceiling, see Fig. 1. The positions and orientations of diffusers are random. This is in accordance with the standard ISO 354 [9]. The measurements in empty room were carried out with and without diffusers, while the measurements with test specimens were carried out only with diffusers. In addition, the measurements with diffusers are repeated having different number of them placed in their positions, from all 5 to none of them.



Fig. 1. Reverberation room of the Faculty of Electronic Engineering in Niš with all 5 diffusers.

The reverberation times are measured and EDCs are generated using the *swept sine* technique and interrupted noise technique. In this paper, only the results obtained by the former technique are presented. Logarithmic *swept sine* signal of length of 30 s and frequency range from 20 Hz to 11 kHz sampled at 44.1 kHz repeated twice with the silence in between of 30 s is used as an excitation signal.

The excitation is emitted by the omni-directional spherical sound source having 12 loudspeakers in dodecahedral distribution, see Fig. 2. The responses are recorded by the 1-inch measurement microphone Bruel & Kjaer, type 4144. The measurement equipment also contains an audio amplifier, external sound card, microphone power supply and laptop.

As defined in the instructions for the *round robin* test, 12 regular combinations of source and microphone positions are used for the measurements. Two additional combinations include 2 microphone positions in the room corners for a particular sound source position. This gives 14 combinations in total, obtained for 4 positions of the sound source and 3 positions of the microphone plus two corner positions for the microphone. Regular positions for the sound source and microphone are chosen in accordance to the standard ISO 354. Every source and microphone position has its own height of the transducer. For every test sample, the measurements are repeated twice (with and without the sample).

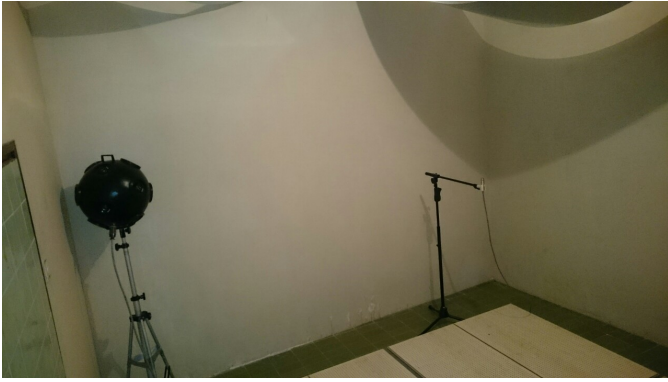


Fig. 2. Measurement setup showing omni-directional sound source and measurement microphone in the reverberation room.

V. RESULTS

The repeatability of EDCs obtained by the Schroeder backward integration from 5 repeated measurements in the same points is illustrated in Fig. 3. The EDCs from repeated measurements coincide very well to each other, especially in broadband and EDCs filtered in third-octave bands at high and mid frequencies. Somewhat larger deviations among the curves appear in the EDCs at low frequencies. The only case where the differences among the EDCs are larger is the third-octave band at 100 Hz, see Fig. 3(d). The cause of the mentioned (in the majority of cases small) differences among the EDCs can be the positioning of the source/microphone. Since these positions are not strongly fixed by a hard construction, but instead by using markers and measuring distances from the reference walls and floor, there is a possibility of having a slight change of source/microphone positions from measurement to measurement.

Changing the positions of the sound source and microphone leads to certain changes of the EDCs. These changes for broadband EDCs are illustrated in Fig. 4(a). EDCs for different combinations of source and microphone positions have somewhat different shapes. Thus, regular decay curve shape (linear main decay), but also multi-rate decay and concave shapes of the decay curves can be found.

The changes in EDCs in third-octave bands caused by changes of sound source and microphone positions depend on frequency band. At higher and mid frequencies (above several hundred Hz), the differences among EDCs for different combinations of source and microphone positions are rather small. A representative case where EDCs coincide very well with each other is shown in Fig. 4(b).

Observing EDCs in third-octave bands at lower frequencies, more prominent differences in the main decay among the EDCs begin to appear mainly from 315 Hz downwards. In the frequency bands from 315 Hz to 200 Hz, the EDCs have a rather regular shape, and different decay rate, see Fig. 5. From 160 Hz towards the lower frequencies, in addition to different decay rate, there are different shapes of the EDCs, too. As mentioned above, these different shapes are related to regular linear main decay, multi-rate decay, concave shape and some other irregular shapes.

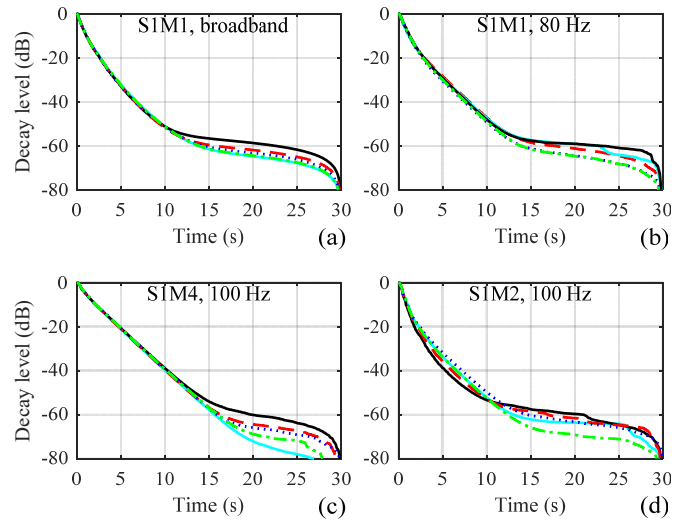


Fig. 3. EDCs from five repeated measurements for source position S1 and microphone positions M1, M4 and M2.

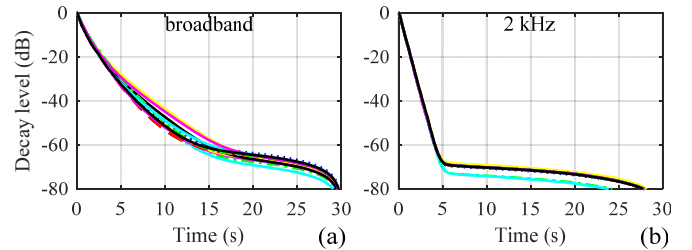


Fig. 4. (a) Broadband EDCs and (b) EDCs in third-octave band at 2 kHz obtained for all 14 combinations of sound source and microphone positions.

Two special cases of EDC differences at low frequencies are presented in Fig. 6. The first one given in Fig. 6(a) is related to regular shape of EDC with linear main decay, where the differences caused by changing the source and microphone positions are reflected in differences in the decay rate. These decay rate differences are even not that large comparing to similar differences in other frequency bands. The second special case shown in Fig. 6(b) is related to the largest differences among the EDCs at 100 Hz. Here, in a single frequency band, several different shapes of EDCs are present (the regular one, multi-rate decay and concave shape).

Placing diffusers inside the reverberation room should improve the diffusivity of the sound field. Here, opposite effects of removing the diffusers from the room are observed. Previously presented results are obtained having all five diffusers hanging from the ceiling. Then, these diffusers are removed one by one and the measurements are repeated for one combination of sound source and microphone position. The broadband EDCs for these six cases (including the one without diffusers) are presented in Fig. 7(a), while EDCs in third-octave bands are given in Fig. 7(b) to 7(d).

By increasing the number of diffusers, broadband EDC becomes steeper in the main decay part. This will reduce the decay rate, although the differences are not that large. Similar effect is noticed in the EDCs in third-octave bands. Here, the largest changes are observed at mid frequencies of several

hundred Hz. In these frequency ranges, the EDCs have regular shape, and the effects of diffusers can be tracked in an easier way. This is not the case at lower frequencies, below 160 Hz, where the EDCs are typically irregular, see Fig. 7(d).

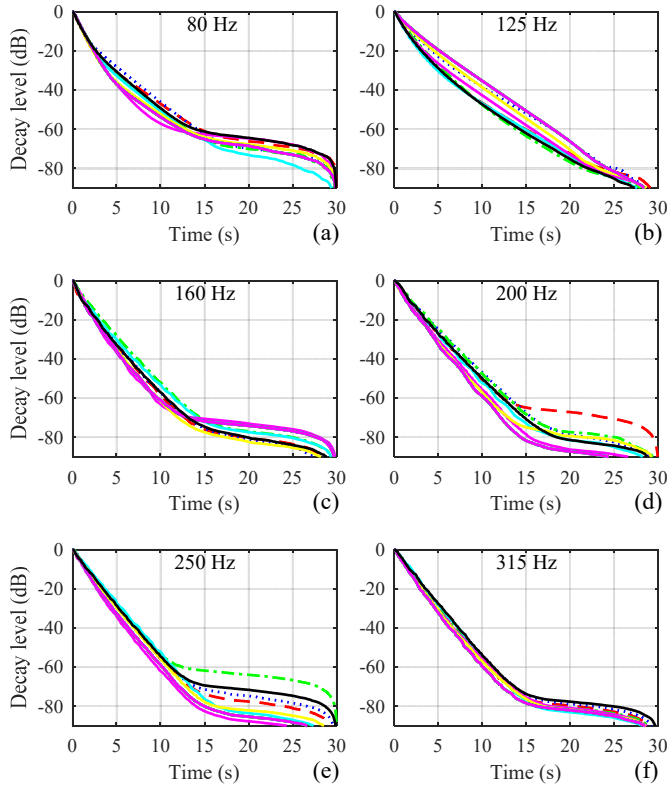


Fig. 5. EDCs in third-octave bands at low frequencies for all 14 combinations of sound source and microphone positions.

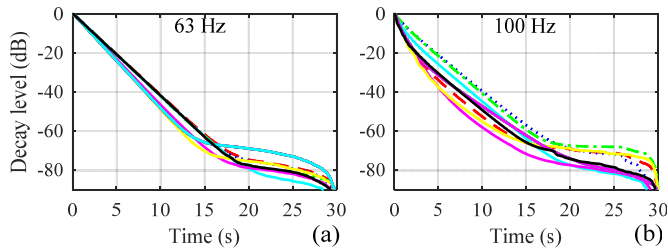


Fig. 6. Special cases of EDCs differences in third-octave bands at low frequencies for all 14 combinations of sound source and microphone positions.

Reverberation time (RT) is calculated from the obtained EDCs using the default range from -5 dB to -35 dB, except for the EDCs at 50 Hz, where RT is calculated in the range from -5 dB to -30 dB due to reduced dynamic range available in this frequency band. At lower frequencies (up to 315 Hz), changing the source and microphone position leads to more prominent change of RT, see Fig. 8(a). By increasing the frequency, this change of RT becomes smaller, and the curves presenting RT values for all 14 source/microphone positions become closer to straight lines, as shown in Fig. 8(b).

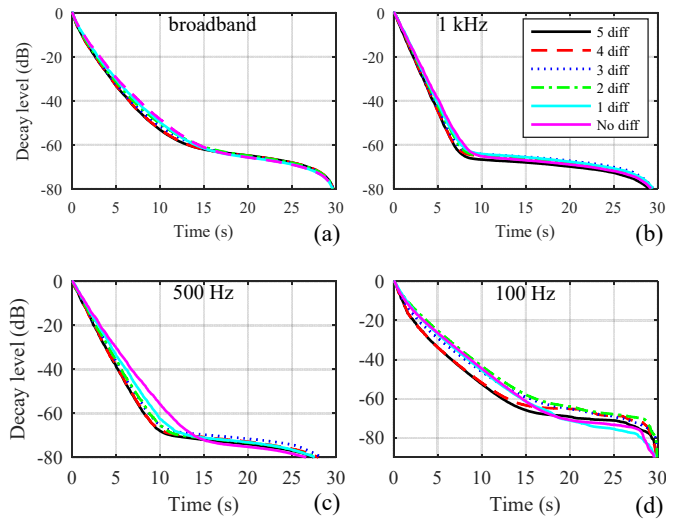


Fig. 7. (a) Broadband EDCs and (b) to (d) EDCs in third-octave bands obtained having different number of diffusers in the reverberation room and without diffusers for sound source position S1 and microphone position M2.

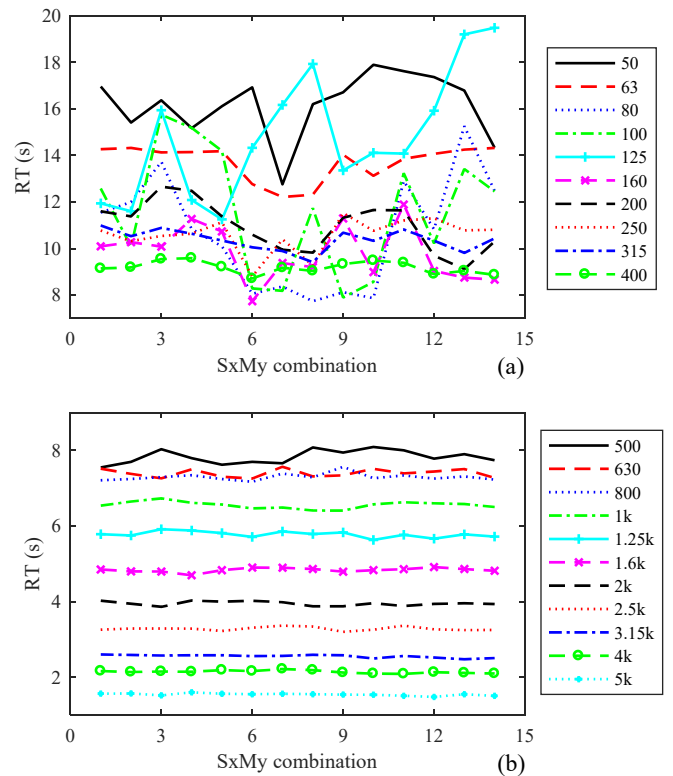


Fig. 8. Reverberation time (RT) calculated from EDCs in third-octave bands for different combinations of sound source (Sx) and microphone (My) positions (14 in total) for one set of repeated measurements.

These RT values are used for calculation of relative standard deviation of decay rate (S_{rel}). This diffusivity descriptor for one set of the measurements in the reverberation room is shown in Fig. 9. The standard deviation is larger at lower frequencies. The greatest value is obtained for 100 Hz. The most prominent differences among EDCs caused by both repeating the measurements and changing the source/microphone position exist in this frequency band.

Somewhat smaller values of standard deviation of decay rate exist at 50 Hz and 63 Hz. This could be a consequence of smaller dynamic range used for RT calculation at the former frequency, and rather regular EDCs with large dynamic range of the main decay at the latter frequency.

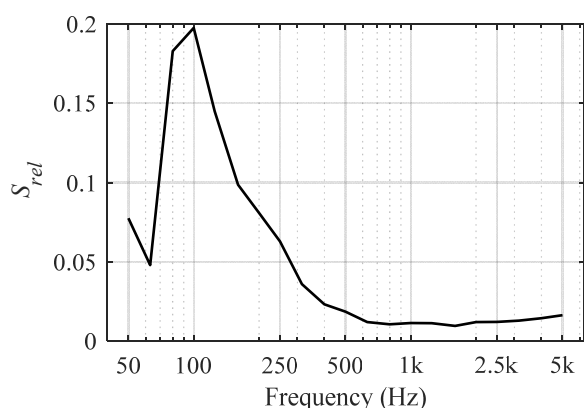


Fig. 9. Standard deviation of decay rate (S_{rel}) calculated using RT values in third-octave bands for one set of repeated measurements from Fig. 8.

Another descriptor of sound field diffusivity calculated here is related to correlation coefficient between the obtained EDCs and the best-fitted straight lines, that is, the effective measure of the curvature (κ). This descriptor for one of the repeated set of measurements is given in Fig. 10. The shape of this descriptor is very similar to the shape of standard deviation (S_{rel}) from Fig. 9. Similar as with S_{rel} , this descriptor (κ) has larger values at low frequencies. The greatest value is in the frequency band at 100 Hz, and the reasons are those already mentioned above. It is interesting to note that the value of κ in the frequency band at 65 Hz is very close to 0, meaning that the main decays of EDCs in this band are the closest to the straight lines.

VI. CONCLUSION

Diffuse sound field is one of the most important requirements for acoustical measurements such as the ones of absorption performance of test material in a reverberation room. Achievement of completely diffuse field in the whole frequency range of interest is a rather difficult task. Diffusivity of sound field in a small reverberation room of volume of about 65 m³ is investigated in this paper. For that purpose, EDCs obtained from repeated measurements and for different combinations of sound source and microphone positions are observed. Besides, two indirect descriptors, standard deviation of decay rate and linearity of EDCs are used for that purpose. Based on these results, it can be considered that the sound field is diffuse in third-octave frequency bands at 315 Hz and above. In the bands at 250 Hz and 200 Hz, deviations from diffuse sound field are acceptable, while in the bands at and below 160 Hz significant deviations from diffuse conditions are present. It is also noticed in this research that adding the diffusers in the room leads to a steeper main decay of the EDC.

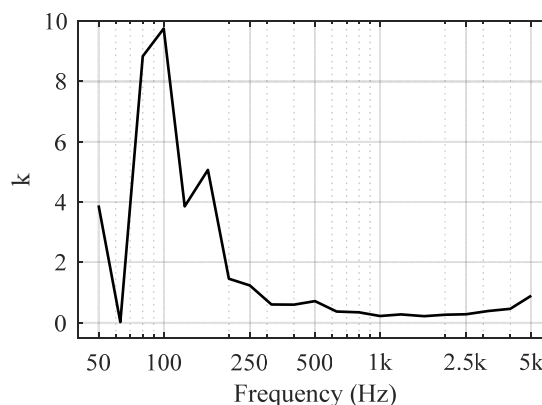


Fig. 10. Effective measure of the curvature (κ) calculated based on the correlation coefficient obtained in third-octave bands for one set of repeated measurements from Fig. 8.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

REFERENCES

- [1] W. O. Hughes, A. M. McNelis, "Examination of the measurement of absorption using the reverberant room method for highly absorptive acoustic foam," 29th Aerospace Testing Seminar, Los Angeles, CA, USA, 27 October, 2015.
- [2] K. V. Horoshenkov, A. Khan, F.-X. J. Becot, et al., "Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests)," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 122, no. 1, pp. 345-353, July, 2007.
- [3] M. Vercammen, M. Lautenbach, "Non diffuse sound field in the reverberation room," Proc. 22nd Int. Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina, 5-9 September, 2016.
- [4] K. H. Kim, J. Y. Jeon, "Effect of diffusion conditions on absorption performance of materials evaluated in reverberation chamber," *Sustainability*, vol. 11, no. 23, pp. 6651 (16 pages), 2019.
- [5] M. L. S. Vercammen, "Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354," Proc. Int. Symp. Room Acoust. ISRA 2010, Melbourne, Australia, 29-31 August 2010.
- [6] T. J. Cox, P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, 2nd ed. New York, USA: Taylor & Francis, 2009.
- [7] E. A. Piana, N. B. Roozen, C. Scrosati, "The DENORMS round robin test: measurement procedure and post-processing of time data," Proc. 26th Int. Congress Sound and Vib. ICSV26, Montreal, Canada, 7-11 July, 2019.
- [8] E. Toyoda, S. Sakamoto, H. Tachibana, "Effects of room shape and diffusing treatment on the measurement of sound absorption coefficient in a reverberation room," *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 25, no. 4, pp. 255-266, 2004.
- [9] *Acoustics—Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room*, ISO 354, 2003.
- [10] C. Scrosati, F. Scamoni, M. Depalma, "On the diffusion of the sound field in a reverberation room," Proc. 26th Int. Congress Sound and Vib. ICSV26, Montreal, Canada, 7-11 July, 2019.
- [11] M. M. Hasan, M. Hodgson, "Effectiveness of reverberation room design: Room size and shape and effect on measurement accuracy," Proc. 22nd Int. Congress Acoustics ICA, Buenos Aires, Argentina, 5-9 September, 2016.
- [12] *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*, ASTM C423-17, 2017.
- [13] D. Ćirić, K. Jambrošić, N. Stojković, "Energy decay curves obtained in reverberation chamber during measurements of absorption coefficient," (in Serbian), Proc. 63rd ETRAN, Silver Lake, Serbia, 3-6 June, 2019.

Usage of Different Wavelet Families in DC Motor Sounds Feature Analysis

Dorđe Damjanović, Dejan Ćirić, Miljan Miletić and Dejan Vujičić

Abstract—Widespread usage of wavelets in signal analysis places this method in a very high position in many researches, especially when audio signal classification is in focus. Wavelets have become an unavoidable segment in signal processing whose nature leads to more comprehensive results in comparison with standard methods, like Fourier transform. There are many wavelet families that have been developed in quite different forms for different purposes. In this paper, a selected set of wavelets is used in the decomposition of direct current (DC) motor sounds to detail and approximation coefficients for the purposes of finding the most suitable wavelets for audio feature analysis. Selection of wavelets is done according to the obtained results, taking into account all available wavelets in Matlab software package. DC motor sounds are recorded in two different conditions: laboratory condition and factory condition, although only those from the laboratory are presented here.

Index Terms— Wavelet families; Detail coefficients; Approximation coefficients; Audio features; DC motor sounds.

INTRODUCTION

Considering the applicability of wavelets, they have been used in many of scientific fields including mathematics, signals processing, acoustics, telecommunications, biomedical engineering, etc [1]. Due to their nature and potentials, we can say that the wavelets are quite widespread today. The wavelets are able to overcome some important problems of standard signal processing methods, such as Fourier transform. Consequently, the wavelets are located high on the scale of signal processing algorithms [2].

Almost every programming language has built in the wavelets algorithms for different purposes, like C, C++, Python, Java and many others [3,4]. It is also important to stress that functions related to wavelets are typically compatible in different programming platforms. Recently, the most popular programs for implementing wavelets are Matlab, LabVIEW, SciLab, Octave, etc [3,4].

De-noising using wavelets is widespread nowadays. It can be found in speech, audio signal and image processing.

Dorđe Damjanović is with the Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac, Svetog Save St. 65, 32000 Čačak, Serbia (e-mail: djordje.damjanovic@ftn.kg.ac.rs).

Dejan Ćirić is with the Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

Miljan Miletić is with the Technical College of Applied Studies in Kragujevac, section in Kruševac, Kosančićeva 36, 37000 Kruševac, Serbia (e-mail: miljan.miletic@vhts.edu.rs).

Dejan Vujičić is with the Faculty of Technical Sciences Čačak, University of Kragujevac, Svetog Save St. 65, 32000 Čačak, Serbia (e-mail: dejan.vujicic@ftn.kg.ac.rs).

Methods of wavelets decomposition into detail and approximation coefficients lead to applications like feature extraction, classification, focus stabilization in video signals, image compression, motion detection and others [4,5]. The results obtained with wavelets are in most cases better than using other algorithms.

Looking from the historical point of view, wavelets take roots in Fourier's researches, but Alfred Haar first mentioned real term and mathematical representation of wavelets, after which this wavelet was named Haar wavelet family [6]. After that, a number of scientist have researched and "upgraded" the existing algorithm to its new and more advanced forms, which have spread to many areas as mentioned above. Some of the proposed wavelets are named after the scientists who invented them like: Gabor, Morlet, Daubechies, etc. Many of new wavelets are just upgraded version of the old ones. From the perspective of the Matlab software package, there are several wavelets that are the most common in different processing tasks like: Haar, Daubechies, Coiflets, Symlet, biorthogonal, reverse biorthogonal and Meyer [7].

In this paper, focus is on usage of different wavelet families in audio feature extraction of direct current (DC) motor sounds. For this purpose, more than 60 DC motor sounds are investigated, both faulty and non-faulty ones, recorded in the laboratory condition. Analysis is done in accordance with the wavelet nature, and the recorded audio signals are decomposed into detail and approximation coefficients. These coefficients have strong relation to audio features, since they can be treated as wavelet-based features that can be used for future classification [8]. One of the main goals of this research is to create potentials to make a difference between faulty and non-faulty motors using sound that they generate. Impact of using different wavelet families in extraction of wavelet-based features is analyzed here. The analysis is done in Matlab software package, and the most representative examples are presented in this paper.

WAVELETS

It is well known that wavelets are developed during the past century. All started with Haar, as it was mentioned, but a number of different wavelet functions have emerged in the meantime, developed from the existing ones or developed as completely new ones [6,9]. The basic wavelet function is given in (1):

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), a > 0 \quad (1)$$

where a and b are the scaling and translation parameter, respectively [10]. Appropriate selection of parameter's (a and b) values is very important for the correct purpose of the wavelet function [10,11].

The most applications based on wavelets functions basically use the discrete wavelet transformation (DWT), whose algorithm is developed on signal decomposition into detail and approximation coefficients using high-pass and low-pass filters, as it was presented in Fig. 1 [7,8]. where, LP is low-pass filter, HP is high-pass filter, A stands for approximation coefficients, D stands for detailed coefficients and $2\downarrow$ is down-sampling.

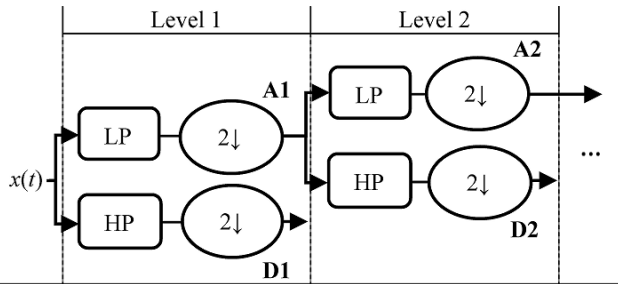


Fig 1. Block diagram of wavelet decomposition.

From the group of wavelet families, Haar (*haar* in Matlab) is the simplest in mathematical form. It is identical to Daubechies 1 (*db1* in Matlab) [6,11]. Equations (2) and (3) give the analytic form of Daubechies 1 or Haar wavelet function:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in [0 \ 0.5] \\ -1 & \text{if } x \in [0.5 \ 1] \\ 0 & \text{if } x \notin [0 \ 1] \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in [0 \ 1] \\ 0 & \text{if } x \notin [0 \ 1] \end{cases} \quad (3)$$

If the order of Daubechies wavelet is increased, its analytic form becomes more complicated. It is worth mentioning that extension of the Daubechies wavelet family by introducing new functions of higher order leads to a wider usage of this wavelet family in various applications [6,11].

In collaboration with Ingrid Daubechie, Ronald Coifman invented wavelet families named Coiflets (*coif* in Matlab). These wavelets are more symmetric and have more vanishing moments than the Daubechies wavelets. From the application point of view, both (Coiflets and Daubechies wavelets) give good results, especially when feature extraction is in focus [6,11].

Symlets are proposed by I. Daubechie as modification of Daubechies wavelets (properties are nearly the same), and in the most cases they provide similar results as Daubechies wavelets [6,12]. Comparing the shapes of these wavelets (their wave presentation), they can be seen as reflections of each other.

Group of wavelets that are different from orthogonal wavelets (Daubechies, Coiflets, Symlets, Meyer) contains biorthogonal compactly supported spline wavelets [6,11]. These wavelets are grouped in biorthogonal and reverse biorthogonal wavelets (*bior* and *rbio* in matlab, respectively). Main features of these wavelets are symmetry and exact reconstruction, which is possible with finite impulse response filters (FIR filters) [6,11].

Yves Meyer proposed Meyer wavelet (*dmey* in Matlab) as another orthogonal wavelet family. The most common usage of this wavelet is in multi-fault classification, adaptive filtering and fractal random fields [11,13].

METHODS OF ANALYSIS

More than 60 DC motor sounds are recorded in the laboratory environment, while only some representative examples are chosen for presentation here. Approximately half of them are faulty motors, and other half belongs to non-faulty motors. The motors are driven in two directions of rotation. Due to simplicity and having in mind that the results for these two directions are similar, only the results for one direction of rotation (direction 1) are presented in this paper. All sounds are recorded with microphone which is placed in the vicinity of motors, sampled at 16 kHz. Length of the recorded signals is around 2 s.

Investigation process starts with segmentation of each signal, as explained in some of previous papers of the authors [8]. Segmentation is done using the segment size of 50 ms and overlap between segments of 50% (25 ms). In the literature, it can be found that different authors use different size of segments and overlap [12,14]. There is no any formal rule what segment and overlap size to apply, although in a number of studies the segment and overlap size are the same as implemented her [14].

Next step is wavelet-based feature extractions. It involves wavelet decomposition process described in Fig. 1. Here, each segment is decomposed with the wavelets into detail and approximation coefficients (high and low frequency components) at each level of decomposition. In this research, the decomposition level varies from 1 up to 8. So, in that manner, the obtained detail coefficients are observed at 8 different levels. Besides the level of decomposition, different wavelet families are applied in this research in order to analyze their effects on the extracted wavelet-based audio features, that is, the detail coefficients. Haar and Meyer wavelets have only one its kind in Matlab, while other wavelets (Daubechies, Coiflets, Symlet, biorthogonal and reverse biorthogonal) have many different types that can be chosen. For instance, Daubechies has more than 45 types in Matlab [7]. In this research, all of the mentioned wavelet families are used, however not all the types, but only the chosen ones.

From the obtained detail coefficients at each level and for every segment, absolute value is first calculated, and then the mean value is applied. Standard deviation (std) of the absolute value of detail coefficients is also calculated and used in this

research. However, since the results obtained with standard deviation and mean value generally show similar trends, and the results obtained using the mean value are more consistent and stable, focus is only on those results here.

Besides the analysis carried out in the domain of wavelet-based features, the recorded signals for non-faulty and faulty motors are compared also in the time and frequency. All processing is done in Matlab software package with standard commands for wavelet analysis: *wavedec* for wavelet decomposition, *appcoef* and *detcoef* for obtaining the approximation and detail coefficients, *abs* and *mean* for calculating absolute and mean values, respectively [7,8].

Special attention is paid to differences between non-faulty and faulty motors in all used domains - time and frequency domain, but also in the domain of wavelet-based features (detail coefficients and values calculated from them).

RESULTS

Several different cases of correlation between the results in time/frequency domain and wavelet-based features domain are identified in this research. Two of them, considered to be the most common ones, are presented here. The first case is related to scenario where there are visible differences between non-faulty and faulty motors in both spectra and detail coefficients. The second scenario is opposite to the first one, and consists of samples where differences between non-faulty and faulty motors are negligible in all considered domains. In other words, there are no significant differences between them in time signals, spectra or detail coefficients.

A. Prominent differences between non-faulty and faulty motors

The first domains that are observed are time and frequency domains. Characteristic examples of time domain signals and spectra for one non-faulty and one faulty motor are shown in Fig. 2. In this and other figures given in the rest of the paper, the style of lines is the same: blue solid line for non-faulty motors, and red dashed line for faulty motors.

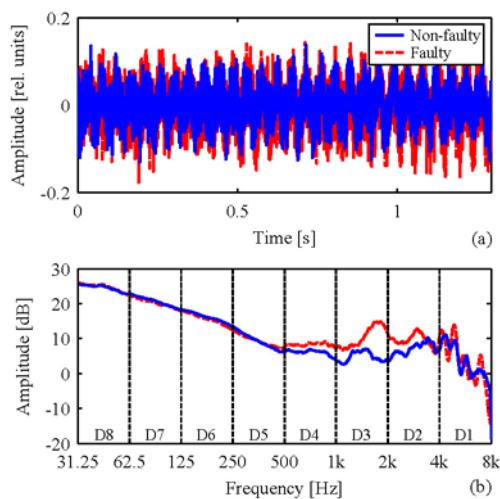


Fig. 2. Characteristic example of prominent differences between signals (sounds) of non-faulty (blue) and faulty (red) DC motors: a) time domain, b) frequency domain

Comparing these two domains, time domain is the one where it is the most difficult to notice difference between the motors. The amplitude of the motor sound typically shows some fluctuations in time. Since most of energy is located at low frequency, the slower fluctuations that corresponds to these low frequency components are more prominent in the time domain signal.

On the other hand, frequency domain analysis can provide visible differences between compared motors (non-faulty and faulty ones), see, for example Fig. 2(b). In this particular example, more prominent differences exist at mid and high frequencies (above 500 Hz).

In order to understand in an easier way, the ratio standing behind the correlation between differences in the considered domains, especially in the frequency and wavelet-based features domains, the decomposition process using the wavelets is explained here from another perspective. All signals are sampled at 16 kHz, so the maximum frequency in signals is 8 kHz. At the first level of decomposition, signal passes through a high pass and low pass filter. Signals at the filters' output are down sampled by 2, generating the detail and approximation coefficients (the procedure is illustrated in Fig. 1). In the frequency domain, this decomposition corresponds to dividing the frequency range by 2 in two subranges. Thus, the detail coefficients at decomposition level 1 correspond to frequency range from 4 kHz to 8 kHz. In this manner, the detail coefficients at decomposition level 2 correspond to the frequency range from 2 kHz to 4 kHz, etc [15].

The next step in signal processing is the segmentation and calculation of wavelet-based features (the detail coefficients and their mean and std values from the segments). Fig. 3 presents the detail coefficients of the signals from Fig. 2 generated using Daubechies 2 wavelet after applying the absolute values to the detail coefficients and mean values of those absolute values from the segments.

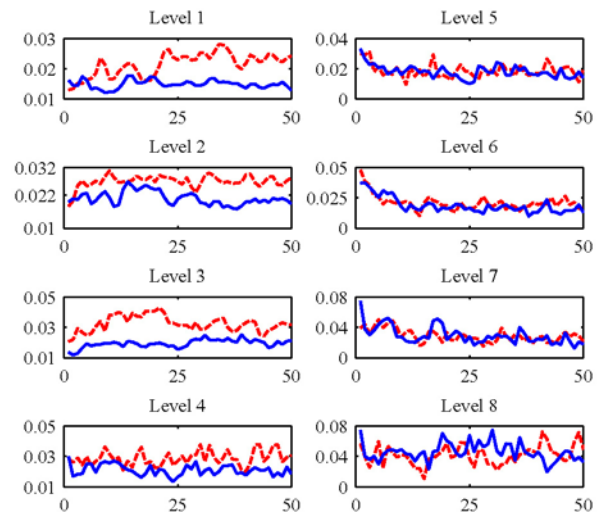


Fig. 3. Detail coefficients obtained after applying Daubechies 2 wavelet to segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) for non-faulty (blue) and faulty motor (red), and using the decomposition levels from 1 to 8.

Now, the differences between non-faulty and faulty motors can be compared observing both frequency domain, see Fig 2(b), and features domain, see Fig. 3. In both domains, the differences are prominent at the decomposition levels from 1 to 4, that is, in the spectra, in the frequency range from 500 Hz to 8 kHz. In order to clarify the relation between the frequency ranges and the decomposition levels, the vertical lines are shown in Fig. 2(b) splitting the frequency range. Daubechies 2 wavelet provides good results in this case, and the differences between the motors are prominent. Other wavelet families need to be considered in this regard, too.

It is already mentioned that the Daubechies wavelet family consists of more than 45 types. Several of them are applied in this research (Daubechies 4, 5, 6, 8, 15), and all of them give similar results as Daubechies 2. In Fig. 4, the wavelet-based features for the decomposition levels 1 and 3 calculated using the wavelet families Symlet, Coiflets, Meyer, biorthogonal and reverse biorthogonal are presented.

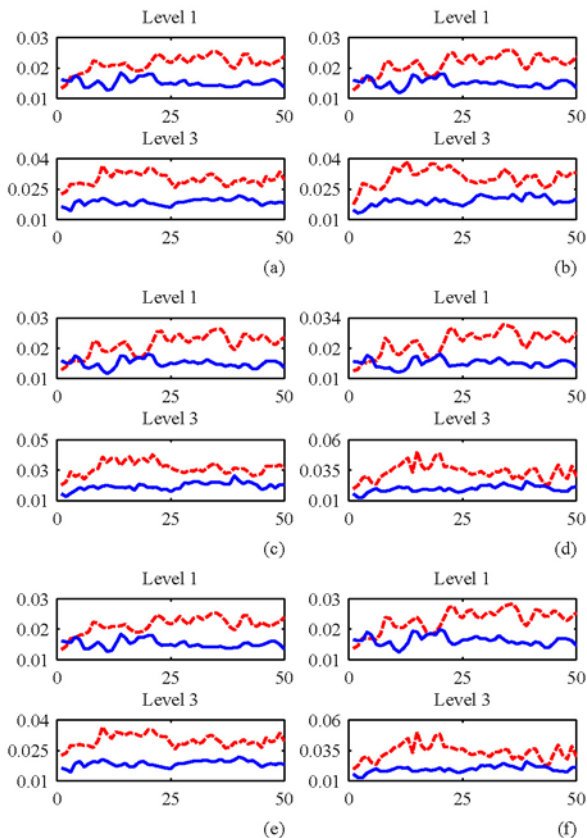


Fig. 4. Detail coefficients of segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) obtained for non-faulty (blue) and faulty motor (red), and using the decomposition levels from 1 and 3, after applying wavelet: a) Haar, b) Symlet 4, c) Coiflet 3, d) Meyer, e) biorthogonal 1.1 and f) reverse biorthogonal 6.8; the case where differences between motors are prominent.

All the results presented in Fig. 4 are very similar with those ones obtained using the Daubechies 2 wavelet at the decomposition levels 1 and 3. This means that the shapes of the wavelet-based features obtained using different wavelets are not completely the same, but there are significant differences between non-faulty and faulty motors. For all

other levels, the situation is almost the same. For some wavelets, the differences between the motors are somewhat larger, while for some other they are somewhat smaller.

Another comparison of effects of using different wavelets is given in Fig. 5, where detail coefficients at the decomposition level 2 are presented for several wavelets. Daubechies 2 is chosen as the reference one to be compared with the others. The results (wavelet-based features) for the Symlet 15 wavelet are rather similar to the ones for the Daubechies 2, since these two algorithms are rather similar to each other in the mathematical representation [6]. The results for other two wavelets are more interesting to analyze. Biorthogonal 3.9 leads to smaller differences between coefficients for the non-faulty and faulty motor in the first half of the segments (in the first part of the wavelet-based feature). The differences get larger in the second part of the feature. In the case of reverse biorthogonal 6.8 wavelet, the differences are even greater than those obtained with Daubechies 2 and Symlet 15 wavelets.

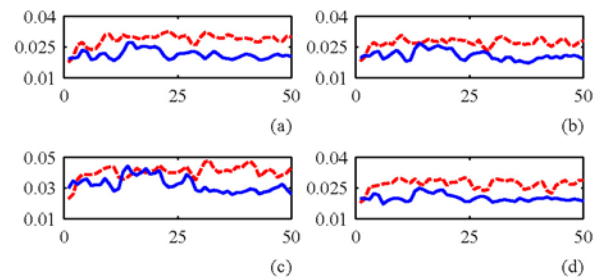


Fig. 5. Detail coefficients of segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) for non-faulty (blue) and faulty motor (red) and using the decomposition level 2, after applying wavelet: a) Daubechies 2, b) Symlet 15, c) biorthogonal 3.9, d) reverse biorthogonal 6.8; the case where differences between motors are prominent.

Generally speaking, all wavelet families whose results are presented here provide useful results in the feature separation (distinction between non-faulty and faulty motors). The literature proposes usage of some wavelets more than others [12,16]. In similar manner, here several promising wavelet families are identified for a particular task of making a difference between non-faulty and faulty DC motors.

B. Negligible differences between non-faulty and faulty motors

In the second analyzed case, the differences between non-faulty and faulty motors are either small or do not exist at all. A few facts can be attributed to this phenomenon. One is that faulty motor do not have serious faults in their construction and work. If it is so, its sound can be very close to the non-faulty motors. Another option is that a motor is characterized as faulty by mistake.

An illustrative example of a pair of non-faulty and faulty motor from this case (scenario) is given in Fig. 6, where time and frequency domain of motor sounds are presented. In both domains, the differences between these motors are negligible.

When these signals are segmented and decomposed into detail and approximation coefficients, the obtained results using the Daubechies 2 wavelets are presented in Fig. 7. In this case, there are some minor differences at the levels 1 and

2. However, they are much smaller than those given in Fig. 3. At the other decomposition levels (from 3 to 8), the trends for the wavelet-based features are very similar for non-faulty and faulty motors. This means that wavelet-based features for the non-faulty motor coincide very well with the features for the faulty motor. There are certain differences in the feature values in particular segments, but they are not large enough and consistent to make a distinction between these motors.

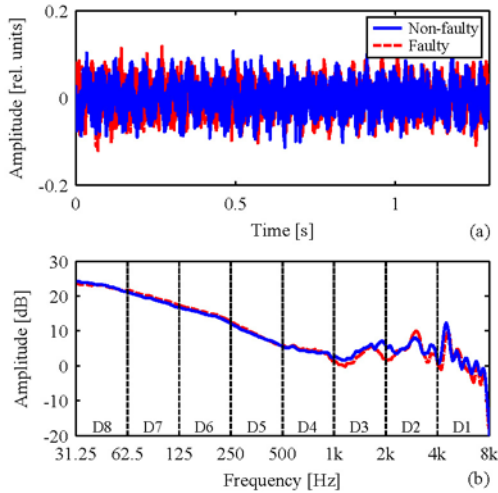


Fig. 6. Signals (sounds) of non-faulty (blue) and faulty (red) DC motors and negligible differences between them: a) time domain, b) frequency domain.

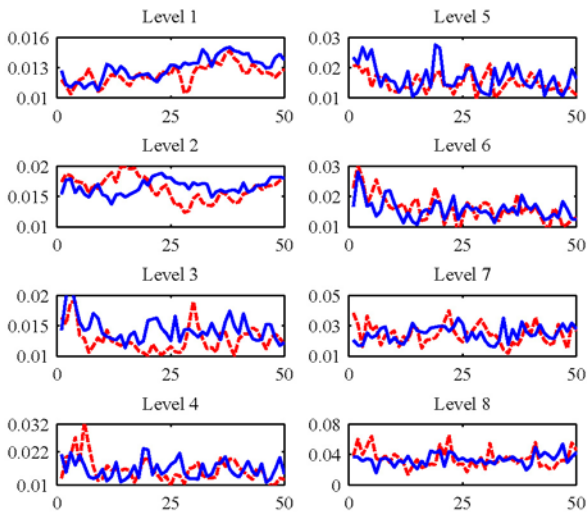


Fig. 7. Detail coefficients after applying Daubechies 2 wavelet to segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) for non-faulty (blue) and faulty motor (red), and using the decomposition levels from 1 to 8; the case where differences between motors are negligible.

The analysis continues using different wavelet families for signal decomposition and features extraction. In Fig. 8, some characteristic results for wavelet-based features from this case are shown at the decomposition levels 2 and 3. Here, the same wavelets are used as in Fig. 4. The results are similar for all these wavelet families, where differences between non-faulty and faulty motors are generally small again. For some wavelets, they are slightly larger, such as Meyer and reverse biorthogonal 6.8 at the decomposition level 3, while for the other wavelets the differences are slightly smaller.

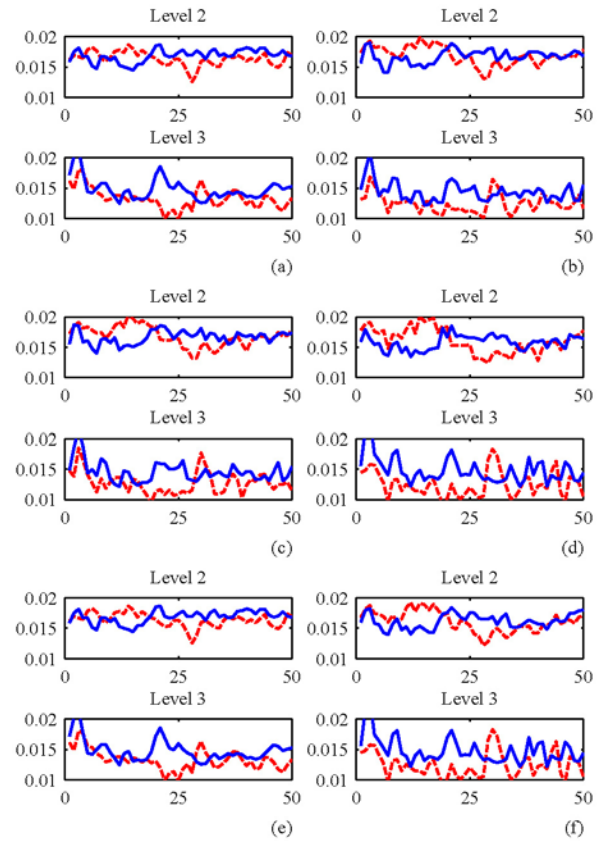


Fig. 8. Detail coefficients of segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) for non-faulty (blue) and faulty motor (red), and using the decomposition levels 2 and 3, after applying wavelet: a) Haar, b) Symlet 4, c) Coiflet 3, d) Meyer, e) biorthogonal 1.1 and f) reverse biorthogonal 6.8; the case where differences between motors are negligible.

The level 4 in the decomposition process with Daubechies 2 wavelet (Fig. 7) shows somehow interesting behavior. In the beginning of the wavelet-based feature, there is a peak for the faulty motor leading to a certain difference between motors in this part of the feature. This is why, and similar as done in Fig. 5, the results for different wavelets (Daubechies 2, Symlet 15, biorthogonal 3.9 and reverse biorthogonal 6.8) and only decomposition level 4 are presented in Fig. 9. The mention peak is present in all given features. It is also noticed that the features of the non-faulty motor obtained using Symlet 15 and biorthogonal 3.9 wavelets has somewhat larger fluctuations than in other two cases.

For this case (scenario) of negligible differences between motors, it is important to emphasize that wavelet-based features (the detail coefficients) behave in similar manner as the spectra of corresponding signals meaning that the differences between non-faulty and faulty motors are either not present or they are rather small. Another observation is that there are no significant differences among the wavelets whose results are presented here.

To quantify the differences between the wavelet-based features for non-faulty and faulty motors, a quantity named feature difference is calculated in two ways. This quantity is obtained as the mean of differences between the features from all segments normalized by the mean feature value. This mean

of differences is calculated taking into account either signed differences between features (difference A) or absolute value of the differences (difference B). The results for the analyzed cases (prominent and negligible differences between non-faulty and faulty motors) are presented in Fig. 10. Both differences A and B are larger at the decomposition levels from 1 to 4 in Fig. 10(a). Larger values of difference A show consistent trend of having larger feature values for one of the motors in most of the segments. This is not the case with the difference B showing larger values wherever there are larger differences in feature values for most of segments independently of the sign of these differences.

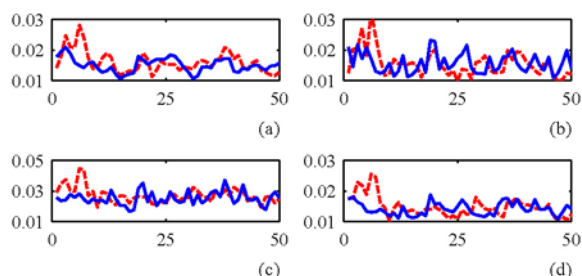


Fig. 9. Detail coefficients of segmented signals (with taking coefficient absolute value and mean value) for non-faulty (blue) and faulty motor (red) and using the decomposition level 4, after applying wavelet: a) Daubechies 2, b) Symlet 15, c) biorthogonal 3.9, d) reverse biorthogonal 6.8; the case where differences between motors are negligible.

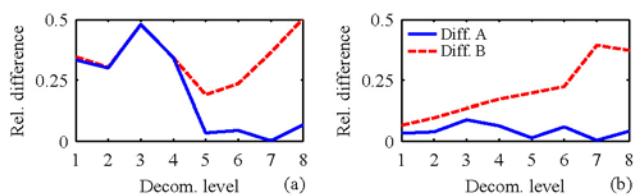


Fig. 10. Differences A and B between wavelet-based features for non-faulty and faulty motors at different decomposition levels for (a) prominent and (b) negligible differences between these motors

CONCLUSION

Wavelets usage in different fields of research becomes more spread every day. The exemplary applications include feature extraction and classification. This is enabled by its ability to decompose a signal into detail and approximation coefficients that could be used as features.

Two typical cases of correlation between the results for the DC motor sounds in frequency and feature domain are investigated in this research, the one where there are obvious differences between non-faulty and faulty motors and another one where differences are either very small or they are not present at all. More than 60 motors are included in the analysis using various wavelet families: Haar, Daubechies, Coiflets, Symlet, biorthogonal, reverse biorthogonal and Meyer. The decomposition is done from the level 1 to the level 8, and all processing is done in Matlab software package. Besides in the feature domain, the signals also are observed in the time and frequency domain. Special attention is paid to the relation between the results in different domains.

The presented results show that wavelets can be used for

obtaining the audio features from DC motor sounds. The features are calculated applying the segmentation first, then wavelet decomposition, and some basic operations such as absolute and mean value on the generated detail coefficients.

Regarding the wavelets applied for the purpose of feature extraction, the effects of changing the wavelet function on the extracted features are not that large if the function belongs to the set used in this research.

ACKNOWLEDGMENT

The work presented in this paper was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (the work of the first and fourth author). This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, 6527104, AI-Com-in-AI (the work of the second and third author).

REFERENCES

- [1] D. Baleanu, *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*, IN-TECH, April 04, 2011.
- [2] M. Sifuzzaman, M.R. Islam, M.Z. Ali, "Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform", *Journal of Physical Sciences*, vol. 13, pp. 121-134, 2009.
- [3] N. Bogdanovs, E. Grabs, E. Petersons, "Software Implementation of Real-time Discrete Wavelet Transform Algorithm with Filter Banks", *International Journal of Information Systems in the Service Sector*, Vol. 8, Issue 2, April 2016.
- [4] F. Qi-bin, L. Hong, "An overview on wavelet software packages", *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, Vol. 6, No. 1, pp. 593-600, March 2001.
- [5] S. Berry, "Practical wavelet signal processing for automated testing", *AUTOTESTCON*, International Automatic Testing Conference, pp. 653-660, San Antonio, TX, USA, 30 Aug.-2 Sept. 1999.
- [6] R.J.E. Merry, "Wavelet Theory and Applications: a literature study", *Technische Universiteit Eindhoven*, Eindhoven, June 7, 2005.
- [7] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.-M. Poggi, *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*, COPYRIGHT 1997–2019 by The MathWorks, Inc.
- [8] Đ. Damjanović, D. Ćirić, Z. Perić, "Analysis of DC Motor Sounds Using Wavelet-Based Features", *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering "(Ic)ETTRAN 2019"*, Srebrno jezereo, ISBN 978-86-7466-785-9, pp. 17-22, Serbia, June 3 - 6, 2019.
- [9] G. Tzanetakis, G. Essl, P. Cook, "Audio Analysis using the Discrete Wavelet Transform", *Proceedings of the WSES International Conference Acoustics and Music: Theory and Applications (AMTA 2001)*, pp. 318-323, Skiathos, Greece, January 2001.
- [10] D. Radunović, *Wavelets - from Math to Practice*, Belgrade, Serbia: Springer with Academic Mind, 2009.
- [11] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, Elsevier Inc., October 9, 2008.
- [12] R. S. S. Kumari, D. Sugumar, "Wavelet Based Feature Vector Formation for Audio Signal Classification", *ICACC 2007 International Conference*, Madurai, India, pp. 752-755, 9-10 Feb, 2007.
- [13] V. V. Valenzuela, H. M. de Oliveira, "Close expressions for Meyer Wavelet and Scale Function", *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicacoes SBRT 2015*, January 2015.
- [14] M. C. Sezgin, B. Günsel, G. K. Kurt, "Perceptual audio features for emotion detection", *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, No. 16, pp. 1-21, 2012.
- [15] A. Kandaswamy, C. Sathish Kumarb, Rm. Pl. Ramanathanc, S. Jayaramana, N. Malmurugana, Neural classification of lung sounds using wavelet coefficients, *Computers in Biology and Medicine*, pp. 523-537, Vol. 34, Issue 6, September 2004.
- [16] M. Daniels, "Classification of Percussive Sounds Using Wavelet-Based Features", Ph.D. dissertation, CCRMA, Stanford University, 2010.

Izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Marko Milivojčević, Dejan Ćirić

Apstrakt— U ovom radu su izdvojena, a zatim i analizirana akustička obeležja motora sa unutrašnjim sagorevanjem putničkih vozila pokretanih najzastupljenijim fosilnim gorivima - benzinom i dizelom. Analiza je realizovana u softveru Matlab upotrebom predefinisanih funkcija za izdvajanje akustičkih (audio) obeležja signala. Analizom su obuhvaćena obeležja u vremenskom i u frekvencijskom domenu, odnosno, ukupno je analizirano po 35 akustičkih obeležja za svaki tip pogonskog goriva. Cilj ovako obimne analize je izdvajanje značajnih akustičkih karakteristika (obeležja) na osnovu kojih bi postojala mogućnost razlikovanja tipa pogonskog goriva kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem korišćenih u putničkim vozilima.

Ključne reči—akustičke karakteristike, motori sa unutrašnjim sagorevanjem, audio obeležja, vremenski domen, frekvencijski domen.

I. UVOD

Zvuk generisan radom motora sa unutrašnjim sagorevanjem sniman mikrofonom postavljenim u oblasti ispod samog motornog prostora, dok se motor nalazi u praznom hodu tj neopterećenom stanju, predstavlja audio signal koji je predmet analize u ovom radu. Ovakav audio signal predstavlja i predmet analize u [1] i [2], a sve sa ciljem identifikacije pogonskog goriva na osnovu akustičkih karakteristika datog signala. U [1] su analizirani spektri signala audio zapisa koji potiču od motora pokretanih različitim pogonskim gorivima, pri čemu su utvrđene izvesne razlike prilikom poređenja ovih signala. U [2] je analiziran uticaj položaja i tipa mikrofona na karakteristiku audio zapisa, pri čemu je utvrđeno da vremenski oblik signala minimalno varira bez obzira na tačku u kojoj je postavljen merni mikrofoni. Takođe je moguće uočiti da tip izduvnog sistema vozila ne utiče na oblik audio zapisa.

U cilju uočavanja što jasnije razlike u karakteristikama audio signala koji potiču od motora na benzin i dizel u ovom radu je izvršena sveobuhvatnija analiza u odnosu na [1]. Analiza se ovde bazira na izdvajanju audio obeležja (u engl. literaturi *features*) koja se odnose na vremenski i frekvencijski domen. U svakom od ovih domena su, za svaki tip pogonskog goriva, posmatrane karakteristike interesantne iz ugla mašinskog učenja i klasifikacije audio signala. Kako je dostupan broj ovih obeležja veliki, krajnji cilj analize je

izdvajanje najznačajnijih od njih, odnosno karakteristika čijim poređenjem se mogu uočiti najveće razlike između motora.

Rezultati analize pokazuju da postoje akustička obeležja između kojih postoji jasna razlika u zavisnosti od pogonskog goriva.

II. PREGLED LITERATURE

U dostupnoj literaturi može se uočiti da ne postoji veliki broj radova čija je tema izdvajanje i analiza audio obeležja motora sa unutrašnjim sagorevanjem putničkih vozila, kao ni motora sa unutrašnjim sagorevanjem uopšteno. U najvećem broju slučajeva, kada su predmet istraživanja obeležja audio signala, dostupni su radovi na temu automatskog prepoznavanja govora što predstavlja posledicu dugogodišnjeg razvoja ove oblasti. Karakteristike audio signala govora i motora sa unutrašnjim sagorevanjem se razlikuju, kako u vremenskom tako i u frekvencijskom domenu [3], pa je u dosadašnjim radovima akcenat bio na separaciji ova dva izvora signala. Radovi čija su tema isključivo audio signali motora sa unutrašnjim sagorevanjem pretežno su fokusirani na industrijsku primenu i na detekciju nepravilnosti u radu motora pokretanih na jedno od fosilnih goriva, benzin ili dizel [4, 5, 6]. U [7] upotrebljen je psihoakustički pristup analizi audio signala generisanih radom automobilskih motora, odnosno analiziran je jedan od tri bitna parametra sa stanovišta psihoakustike, "grubost" audio signala. Ovo je postignuto upotrebom kompleksne kepralne analize što će se takođe pokazati kao jedno od veoma važnih obeležja u ovom radu.

III. METODOLOGIJA

Uzorci audio signala korišćeni za analizu su generisani četvrocilindričnim motorima putničkih vozila približno iste zapremine u okviru istog tržišnog segmenta, što ne bi trebalo da bude zanemarljiv faktor uzimajući u obzir činjenicu da vozila iz različitih segmenata imaju i različite nivoe zvučne izolacije, kao i kompleksnost izduvnog sistema. U pitanju su vozila iz nižeg segmenta: Renault Clio radne zapremine 1149 cm³ sa četiri ventila po cilindru, pokretan na benzin i Opel Corsa radne zapremine 1248 cm³ sa četiri ventila po cilindru pokretana na dizel takođe korišćena u [1], gde je posmatran spektar signala. Uzorci su snimljeni ručnim snimačem Zoom H4n u mono wav formatu sa rezolucijom od 24 bit po uzorku i sa frekvencijom odabiranja od 48000 odbiraka u sekundi. Rad motora je sniman u režimu praznog hoda na približno 700

Marko Milivojčević – Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, odsek: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: markom@viser.edu.rs)

Dejan Ćirić – Elektronski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dejan.ciric@elfak.ni.ac.rs).

obrataja radilice u minutu. Dužina analiziranih audio sekvenci je 5 sekundi, odabrana tako da ne zahteva preveliko vreme obrade, a da sa druge strane obezbedi dovoljno ponavljanje signala.

Audio obeležja dobijena za dva uzorka zvuka motora su izdvojena primenom predefinisanih funkcija opisanih u [8]. Referenca [8] predstavlja objedinjeni skup matematičkih funkcija za izdvajanje audio obeležja pre svega govornih signala, ali bez ograničenja i na druge tipove audio signala.

Proces izdvajanja obeležja započinje deljenjem originalnog snimka zvuka motora na segmente kraćeg i fiksnog vremenskog trajanja koji se zatim pojedinačno obrađuju u odgovarajućim matematičkim funkcijama. Rezultat ovakve obrade je vektor obeležja koji se dobija nakon obrade u kraćim vremenskim intervalima (*short-term analysis*), a zatim i obradom u intervalima srednje dužine trajanja (*mid-term analysis*), čime se dobijaju statistički parametri, odnosno varijacije obeležja po ovim parametrima - srednja vrednost (*mean*), medijana (*median*), standardna devijacija (*std*), standardna devijacija podeljena srednjom vrednošću (*stdbymean*) maksimalna i minimalna vrednost (*max*, *min*), itd. U funkcijama za podelu ulaznog signala na segmente postoji mogućnost definisanja trajanja segmenta kao i vremenskog koraka analize (preklapanja, u engleskoj literaturi *overlap* ili *hop size*). U ovom radu su korišćene preporučene vrednosti [8] za *short-term* i *mid-term* analizu, odnosno dužina segmenta *short-term* analize od 50 μ s sa korakom od 25 μ s i dužina segmenta 2s sa korakom od 1 s za *mid-term* analizu. Rezultat upotrebe preporučenih parametara je dao najoptimalnije i grafički najjednoznačajnije rezultate.

IV. REZULTATI

Rezultati izdvajanja audio obeležja su predstavljeni grafički pri čemu je x-osa za svako od obeležja iz vremenskog domena vreme kako bi se uočile varijacije odgovarajućih obeležja na celokupnom trajanju audio uzorka.

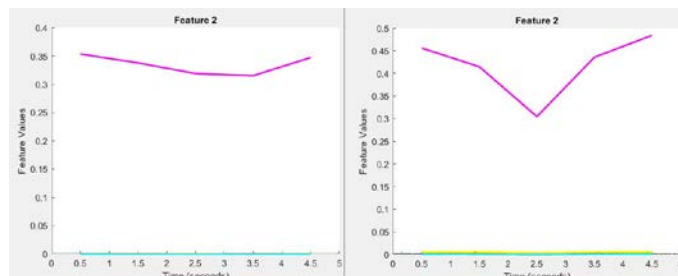
A. Vremenski domen

Izdvojena obeležja u vremenskom domenu predstavljaju najzastupljenija obeležja signala u audio analizi: energiju, entropiju energije i broj prolaza kroz nulu (*zero crossing rate* – *ZCR*).

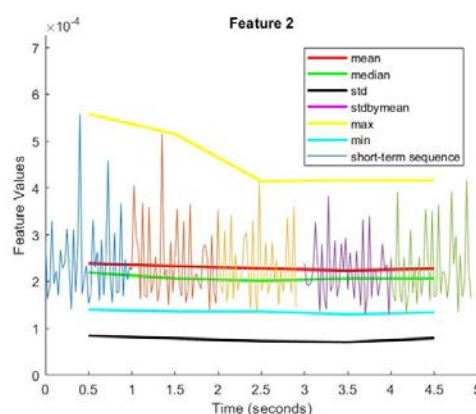
Na Sl. 1 je prikazan rezultat izvršavanja funkcije za izdvajanje obeležja koje prestavlja energiju audio zapisa vozila pokretanih na benzin (levo) i na dizel (desno). Uporednim pregledom obeležja datih na Sl. 1 može se uočiti da se po vrednosti izdvaja standardna devijacija podeljena srednjom vrednošću vektora energije dobijenog pojedinačnim izračunavanjem energije za svaki od audio segmenata analiziranog uzorka.

Detaljnijom analizom proračunatih statističkih parametara iz *mid-term* opsega koji se odnose na energiju signala (maksimalna i minimalna vrednost, medijana, standardna devijacija, srednja vrednost) koje su prikazane na Sl. 2 i 3 jasno se može uočiti razlika u nivoima maksimalne i minimalne vrednosti energije, koja su kod vozila pokretanog

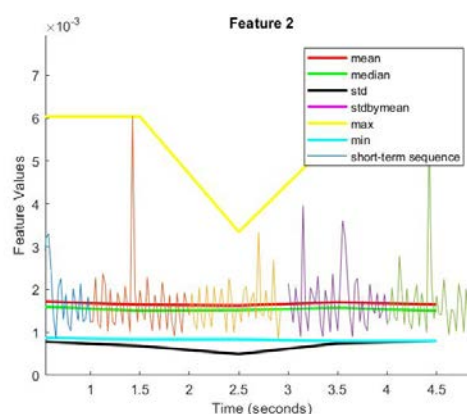
na dizel približno deset puta veće u odnosu na vozilo pokretano na benzin. Posmatrajući srednju vrednost i medijanu takođe se može uočiti da su vrednosti kod dizel motora znatno veće što je posledica višeg nivoa signala koje ovakav motor generiše. Standardna devijacija, kao mera disperzije u određenom skupu, je na obadva uzorka gotovo konstantna, ali je kod dizel motora približno deset puta veća što se u realnosti može precipirati “grubljim” radom motora.



Sl. 1. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na benzin (levo) i na dizel (desno).



Sl. 2. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na benzin, uvećani prikaz.

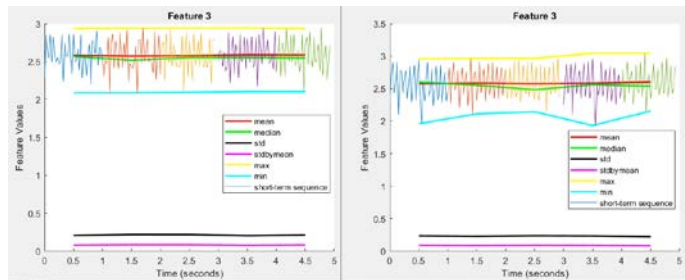


Sl. 3. Audio obeležje energija audio zapisa vozila pokretanog na dizel, uvećani prikaz.

Posmatrajući vrednosti audio obeležja energije u *short-term* intervalima, može se takođe uočiti određena razlika kod dva

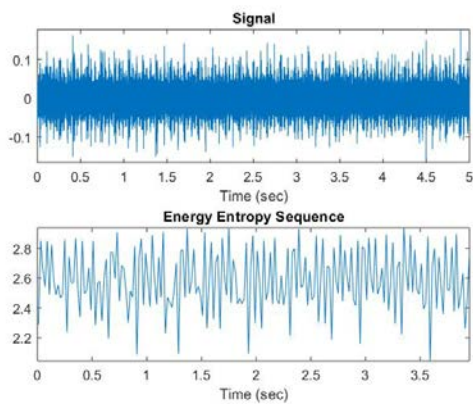
analizirana motora. Naime, kod motora pokretanog na benzin postoji veći broj pikova čije su vrednosti slične, dok se kod motora pokretanog na dizel pojavljuje manji broj pikova veće amplitude u odnosu na ostale vrednosti obeležja (vrednosti u ostalim segmentima).

Entropija energije predstavlja meru nagle promene nivoa energije audio signala [8] što omogućava da ovo obeležje bude upotrebjeno za detekciju značajnih promena u energiji signala kao što su pucnji, detonacije, buka iz okruženja itd. Rezultati izdvajanja ovog obeležja na audio sekvencama motora sa unutrašnjim sagorevanjem su prikazani na Sl. 4.



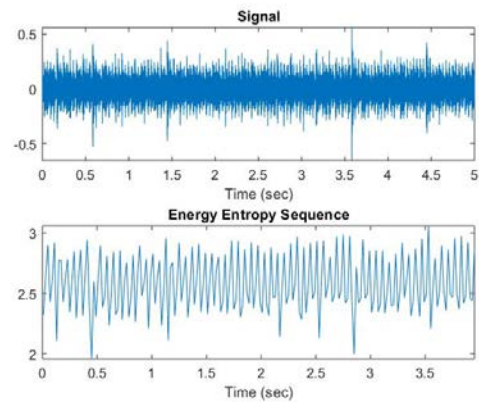
Sl. 4. Audio obeležje entropija energije vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Sa Sl. 4 se može uočiti da su entropije energije motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin i dizel i po vrednosti i po obliku veoma slične, što odgovara “ujednačenom” radu motora u praksi. Perceptivno je moguće zapaziti da je rad konkretnog dizel motora nešto manje “ujednačen” Sa druge strane, oblik audio obeležja entropija energije iz short-term segmenata se nešto razlikuje kod benzin i dizel motora. Ovaj oblik je nešto “hrapaviji” (sa više zubaca) kod benzinskog motora nego kod dizel motora. Ovo je dodatno ilustrovano na Sl. 5 za vozilo pokretano na benzin, odnosno na Sl. 6 za vozilo pokretano na dizel. Signal u vremenskom domenu je ujednačeniji za benzinski motor, što se konvertuje u entropiju energije koja ima „zupčastu” strukturu ali su šiljci (pikovi) češći i ujednačeniji u odnosu na slučaj kod dizel motora, gde se javlja manji broj ovih šiljaka sa većom razlikom u amplitudi.

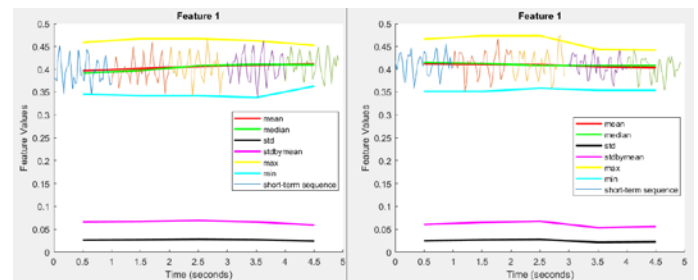


Sl. 5. Audio obeležje entropija energije zvuka vozila pokretanog na benzin dobijena short-term analizom.

Audio obeležje broj prolaza kroz nulu (*Zero crossing rate – ZCR*) predstavlja broj promena predznaka signala u određenom vremenskom okviru, konkretno u ovom radu, u okviru svakog od segmenata analiziranih uzoraka. Izdvajanje ovog obeležja za dva različita tipa pogonskog goriva prikazano je na Sl. 7.



Sl. 6. Audio obeležje entropija energije zvuka vozila pokretanog na dizel dobijena short-term analizom.



Sl. 7. Audio obeležje broj prolaza kroz nulu (ZCR) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Upoređivanjem prikaza izdvojenog ZCR obeležja na Sl. 7 ne može se uočiti značajna razlika između motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin odnosno dizel zato što se radi o motorima sa istim brojem cilindara i istim brojem radnih taktova u jednom ciklusu, pri čemu rade na približno istom broju obrtaja radilice u minutu pa im je i osnovna frekvencija motora približno jednaka [1].

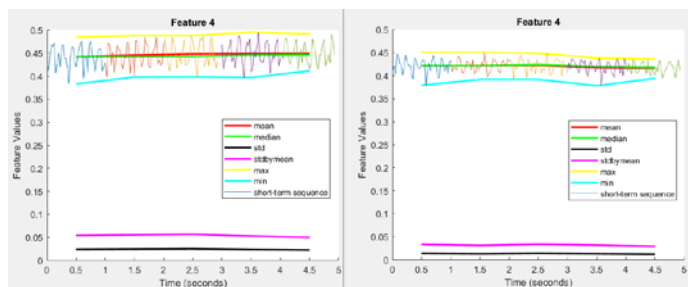
B. Frekvencijski domen

U okviru analize u frekvencijskom domenu prvo je izračunata diskretna Furijeova transformacija (DFT) pojedinačnih segmenata audio uzoraka za svaki od tipova pogonskog goriva nakon čega su izdvojena sledeća obeležja: spektralni centroid i spektralno širenje, spektralna entropija i MFCC (*mel frequency cepstral coefficients*) koeficijenti.

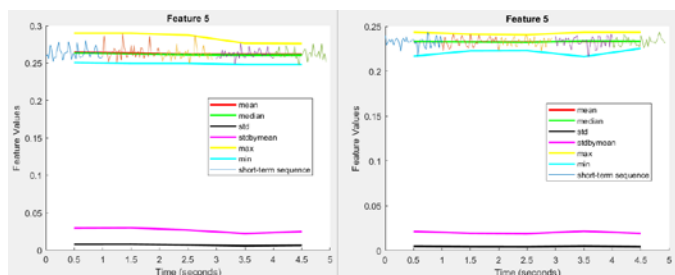
Spektralni centroid i spektralno širenje predstavljaju meru položaja i oblika spektra [8]. Spektralni centroid predstavlja tačku ka kojoj gravitira najveći deo spektra, dok je spektralno širenje druga centralna tačka spektra. Rezultat izdvajanja obeležja spektralni centroid za analizirane uzorke signala je prikazano na Sl. 8 gde se može uočiti kako je tačka ka kojoj gravitira spektar vozila pokretanog na dizel niža u odnosu na

vozilo pokretano na benzin što odgovara percepciji „dubljeg“ zvuka dizel motora.

Posmatrajući funkciju za dobijanje spektralnog širenja, više (veće) vrednosti dobijenog parametra odgovaraju „svetlijem“ zvuku [8]. Na Sl. 9 su prikazani dobijeni rezultati prilikom izdvajanja ovog obeležja, gde je vidljivo da vozilo pokretano na benzin ima nešto više vrednosti što takođe odgovara percepciji da vozila pokretana na benzin imaju manje prigušen, odnosno „svetliji“ zvuk.

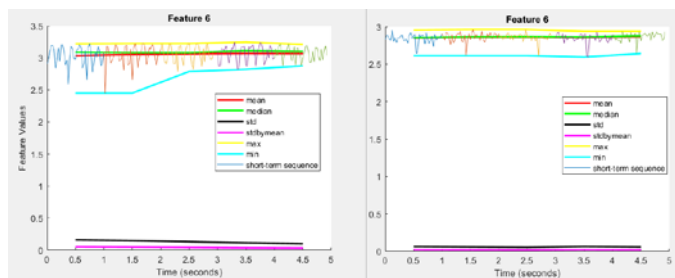


Sl. 8. Audio obeležje spektralni centroid vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).



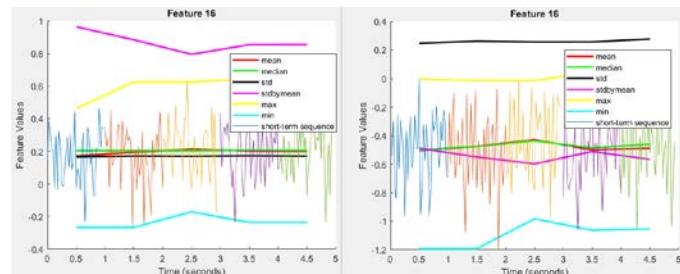
Sl. 9. Audio obeležje spektralno širenje (*spectral spread*) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Spektralna entropija se izračunava na sličan način kao i entropija energije, pri čemu se kod spektralne entropije spektar deli na manje podopsege za koje se računa entropija normalizovane spektralne energije. Ovo obeležje predstavlja promenljivost spektra na određenim učestanostima. Na Sl. 10, koja prikazuje rezultat izdvajanja ovog obeležja, vozilo pokretano na benzin ima nešto više vrednosti spektralne entropije što ukazuje na zauzimanje nešto viših učestanosti u spektru u odnosu na vozilo pokretano na dizel, iako razlike nisu velike.

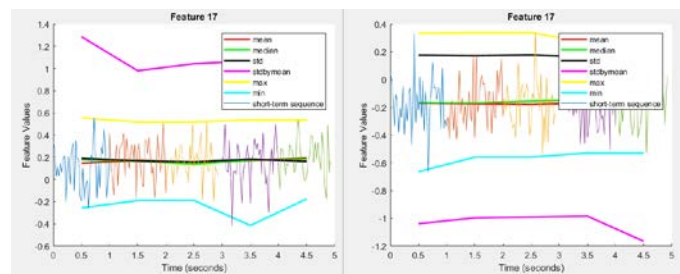


Sl. 10. Audio obeležje spektralna entropija (*spectral entropy*) zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Izdvajanje obeležja MFCC koeficijena je postupak određivanja keprstralnih koeficijena prema mel-ovoj skali koja je bazirana na psiho-akustičkoj percepciji. Ovo obeležje audio signala je veoma zastupljeno u sistemima za automatsko prepoznavanje govora [8, 9]. Od ukupno 13 MFCC koeficijena (obeležja), na Sl. 11 i 12 su prikazana dva kod kojih je posebno jasna vidljiva razlika između vozila pokretanog na benzin i vozila pokretanog na dizel.



Sl. 11. Audio obeležje MFCC broj 8 zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).



Sl. 12. Audio obeležje MFCC broj 9 zvuka vozila pokretanog na benzin (levo) i dizel (desno).

Analizom Sl. 11 i 12 može se uočiti sledeće: vrednost standardne devijacije podeljene sa srednjom vrednošću obeležja je kod vozila na benzin pozitivna, a kod vozila na dizel negativna; maksimalna vrednost obeležja je kod vozila na benzin viša u odnosu na vozilo na dizel; srednja vrednost signala i medijana su kod vozila na benzin pozitivne dok su kod vozila na dizel negativne.

V. ZAKLJUČAK

Analizom obeležja audio signala motora sa unutrašnjim sagorevanjem pokretanih na benzin i dizel izvršena u ovom radu sa ciljem da se identifikuju obeležja kod kojih su uočljive najveće razlike u zavisnosti od pogonskog goriva, obuhvaćena su najzastupljenija audio obeležja iz vremenskog i frekvencijskog domena. Određena obeležja karakteristična za muzičke i govorne signale nisu pružila dovoljno jasne rezultate koji bi pomogli u identifikaciji i razdvajanju motora po pogonskom gorivu, pa su u ovom radu izostavljena.

Među izdvojenim obeležjima, dobijeni rezultati su u skladu sa percepcijom slušaoca, pri čemu se vizuelno mogu uočiti razlike između tipa pogonskog goriva. Frekvencijska analiza, a posebno MFCC koeficijenti su dali najuočljiviju razliku između pogonskih goriva što pokazuje njihov potencijal za identifikaciju pogonskog goriva.

Budući rad će, pre svega, biti oslonjen na potencijal ovih audio obeležja, pri čemu je potrebno proces automatizovati i znatno proširiti brojem analiziranih uzoraka kako bi se utvrdila verodostojnost razlikovanja sa što manjom greškom. Broj prolaza kroz nulu (ZCR) je jedino obeležje u ovom radu kod koga je gotovo nemoguće uočiti razliku između pogonskih goriva, ali postoji mogućnost identifikacije drugih parametara motora sa unutrašnjim sagorevanjem, kao što je broj cilindara ili broj radnih taktova.

Potencijal za dalje izdvajanje ovih obeležja ogleda se i u načinu reprezentacije dobijenih podataka, kao i u ukrštanju odgovarajućih obeležja sa ciljem što tačnije identifikacije pogonskog goriva.

ZAHVALNICA

Istraživanje sprovedeno uz pomoć Fonda za nauku Republike Srbije, 6527104, VI-Com-in-AI.

LITERATURA

- [1] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Comparison of frequency characteristic of sound generated by internal combustion engines depending on fuel," Proc. 26th Noise and Vibration, Niš, Serbia, pp. 115-120, 6-7 December 2018.
- [2] M. Milivojčević, F. Pantelić, D. Ćirić, "Pozicioniranje mikrofona prilikom snimanja audio karakteristika motora putničkih vozila" Proc. 63rd National Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering ETRAN, Srebrno Jezero, Serbia, pp. 58-62, 3-6 June 2019.
- [3] S. A. Amman, M. Das, "Internal combustion engine noise analysis and production using a novel multipulse excited time series modeling technique" *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, pp. 2460, 1996.
- [4] T. A. Nguyen, Y. Kai, M. Mikami, "Study on combustion noise from a running diesel engine based on transient combustion noise generation model," *International Journal of Automotive Engineering*, vol. 3, pp. 131-140, 2012.
- [5] J. Yao, Y. Xiang, S. Qian, S. Wang, "Noise source separation of an internal combustion engine based on a single-channel algorithm," *Hindawi-Shock and Vibration*, vol. 2019, 19 pages, 2019.
- [6] V. Singh, N. Meena, "Engine fault diagnosis using DTW, MFCC and FFT," Proc. of the First International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI 2009), Allahabad, India, pp. 83-94, 20-23 January 2009.
- [7] A. Camacho, G. Piñero, M. de Diego, A. González, "Exploring roughness perception in car engine noises through complex cepstrum analysis," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 94, pp. 130-140, January/February 2008.
- [8] T. Giannakopoulos, A. Pikrakis, "Introduction to Audio Analysis, A MATLAB Approach," Academic Press, 2014
- [9] B. J. Mohan, R. Babu N, "Speech recognition using MFCC and DTW", International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Vellore, India, 9-11 January, 2014.

ABSTRACT

In this paper, the acoustic features of the internal combustion engine passenger vehicles that run on most common fossil fuels - petrol and diesel are allocated and then analyzed. The analysis was performed in Matlab software using the predefined functions for extracting acoustic (audio) features of the signal. The analysis included features in the time and frequency domain, i.e., total of 35 acoustic features were analyzed for each type of fuel. The aim of such a comprehensive analysis is the allocation of relevant acoustic features that would enable making a distinction of the type of fuel in internal combustion engines used in passenger cars.

Extracting Relevant Acoustic Features of the Internal Combustion Engines

Marko Milivojčević, Dejan Ćirić

Analiza algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti različitih klavira

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Jelena Čertić

Apstrakt—„Idealna“ žica koja je zategnuta na oba kraja, ali se ne odlikuje krutošću, pri okidanju osciluje stvarajući niz harmonika koji predstavljaju celobrojne umnoške osnovne frekvencije žice. U realnosti, kada se žica posmatra sa aspekta krutosti, pri njenom pobuđivanju nastali niz harmonika neće sadržati celobrojne umnoške osnovne frekvencije žice, već će harmonici imati frekvencijski pomeraj u odnosu na harmonike idealne žice. Fenomen frekvencijskog pomeraja harmonika je zastupljen kod svih žičanih instrumenata i naziva se inharmoničnost. U ovom radu prikazana je implementacija i upotreba algoritma za određivanje koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira. Algoritam se zasniva na adaptivnom procesu koji izračunava frekvencijsko odstupanje harmonika tona od očekivanih frekvencija za dati ton. Testiranje predloženog algoritma izvršeno je na realnim tonovima različitih klavira. Sprovedena je analiza koeficijenata inharmoničnosti tonova klavira računata sa različitim brojem parcijala tonova. Ispitana je tačnost algoritma i utvrđeni slučajevi u kojima algoritam daje rezultate koji u izvesnoj meri odstupaju od tačnih. Ustanovljeno je da je na osnovu vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za tonove klavira moguće izvršiti klasifikaciju klavira po određenim kriterijumima.

Ključne reči— algoritam, inharmoničnost, fundamentalna frekvencija, klavir, parcijali, ton.

I. UVOD

Poznato je da još iz antičkih vremena da postoje istraživanja vezana za oscilacije žice. Pitagorejci su razmatrali oscilovanje žice koja je bila razapeta iznad drvene rezonantne kutije. Takav mehanizam je nazvan monokord [1]. Proučavajući oscilacije žice na monokordu ustanovili su postojanje određenih intervala pobuđivanjem žice na različitim mestima. Pri takvim istraživanjima smatrano je da je žica zategnuta na oba kraja sa svojstvom idealne fleksibilnosti. Pojam idealne fleksibilnosti žice zanemaruje pojave krutosti, debljine, težine i napetosti žice. Stoga su smatrali da pobuđivanjem takve žice dolazi do nastanka niza parcijala koji odgovaraju celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije žice [2].

Krajem devetnaestog veka *John William Strutt* i lord *Rayleigh* u knjizi *The Theory of the Sound* [3], između ostalog

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Jelena Čertić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: certic@etf.rs).

razmatraju i fenomene nastanka zvuka oscilovanjem žice. Ustanovili su da krutost žica kod klavira utiče na parcijale tonova, tako što frekvencije parcijala tonova na klaviru odstupaju od predefinisanih frekvencija parcijala idealne žice. Fenomen odstupanja frekvencije parcijala tona od tačnih celobrojnih umnožaka osnovne frekvencije tona naziva se inharmoničnost. *R.W. Young* je smatrao da na osnovu jednačine za krutu žicu koju je definisao lord *Rayleigh* moguće objasniti fenomen inharmoničnosti. Na osnovu njegove analize proistekli su sledeći izrazi:

$$f_k = k f_0 \sqrt{1 + Bk^2}, \quad (1)$$

$$B = \frac{\pi^3 Q d^4}{64 l^2 T}, \quad (2)$$

gde Q predstavlja *Youngov* moduo elastičnosti, d prečnik žice klavira, l dužinu žice, a T odgovara napetosti žice. Izraz (1) odnosi se na izračunavanje frekvencija inharmoničnih parcijala tona, gde k predstavlja redni broj parcijala, f_0 osnovnu frekvenciju tona idealne žice, a B koeficijent inharmoničnosti. Pedesetih godina XX veka *Fletcher* je ispitivao univerzalnost jednačine (1) [4]. Razmatrao je dva granična uslova koja nastaju pri zatezanju žice klavira. Prvi granični uslov se zasnivao na kačenju žice klavira na oba kraja, dok se drugi uslov uzimao u obzir žicu koja je učvršćena na oba kraja. Zaključak ispitivanja bio je da oba granična uslova ne odstupaju mnogo od jednačine (1).

Postojanje kako jednostavne tako i univerzalne matematičke jednačine na osnovu koje je moguće izražavanje koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira dovodi do razvoja algoritama i automatskih postupaka za njegovo izračunavanje i procenu. Jedan od metoda za procenu koeficijenta inharmoničnosti predlažu *Galemba* i *Askenfelt* [5] koji se zasniva na inharmoničnom komb filtru, realizovanom u frekvencijskom domenu. Takođe, tehnike poput određivanja visine tona, kepstralne analize i HPS (*Harmonic Product Spectrum*) su korišćene za estimaciju inharmoničnosti [6,7].

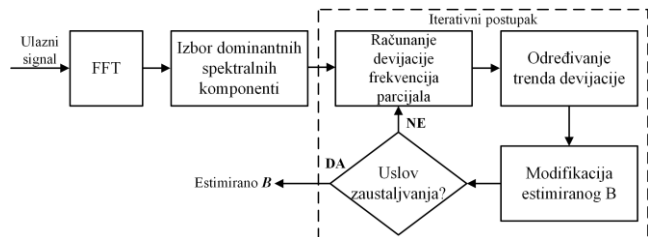
Grupa Finskih naučnika, *Rauhala*, *Lehtonen* i *Välämäki*, predložila je algoritam za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti za žičane instrumente [8]. Njihov algoritam predstavlja metodu frekvencijske devijacije parcijala tonova PFD (*Partial Frequency Deviation*). Princip rada algoritma se zasniva na minimiziranju devijacije, koja je nastala kao produkt neslaganja vrednosti očekivanih frekvencija parcijala tona sa frekvencijama koje odgovaraju maksimalnim amplitudama u spektru posmatranog tona. Proces minimizacije frekvencijske devijacije parcijala zasniva se na adaptivnom procesu, gde je krajnji produkt algoritma estimirana vrednost koeficijenta inharmoničnosti tona.

U ovom radu za procenu koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira koristi se već predloženi PFD algoritam. Rezultati dobijeni ovim algoritmom predstavljeni su kao koeficijenti inharmoničnosti tonova celokupnog opsega osam različitih klavira. Za potrebe analize koeficijenta inharmoničnosti za različite tipove i vrste klavira izvršeno je snimanje tonova klavira na Fakultetu Muzičkih Umetnosti u Beogradu. Klaviri koji učestvuju u analizi razlikuju se kako po veličini, tako i po starosti, kvalitetu i učestalosti njihovog korišćenja. Cilj ovog rada je analiza koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira, kao jedno od mogućih obeležja različitih tipova klavira.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju detaljno je prikazan PFD algoritam koji je korišćen u analizi tonova klavira. U narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju izneti su zaključci do kojih se došlo u ovom istraživanju.

II. METODOLOGIJA

Pojam inharmoničnosti se vezuje za frekvencijsko odstupanje parcijala tona u odnosu na parcijale koji predstavljaju celobrojne umnoške osnovne frekvencije tona. Vrednost koeficijenta inharmoničnosti B moguće je izračunati na osnovu jednačine, ali takav postupak bi zahtevao dosta utrošenog vremena s obzirom na opseg klavira koji se sastoji od 88 tonova. Te zbog toga, u ovom radu preuzeta je metodologija grupacije Finskih naučnika [8], koja se zasniva na automatskoj proceni koeficijenta inharmoničnosti B . Na slici 1 dat je šematski prikaz predloženog algoritma.



Sl. 1 Blok šema algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti

Kao ulazni podaci algoritma koriste se odbirci iz audio signala snimljenog tona klavira. Za posmatrani audio signal, na samom početku algoritma, vrši se procena osnovne frekvencije tona. S obzirom na amplitudsku i frekvencijsku kompleksnost tona klavira konvencionalni algoritmi za određivanje osnovne frekvencije tona, poput autokorelacione metode [9], nisu dali dobre rezultate. Stoga se osnovna frekvencija tona određuje tehnikom koja se zasniva na spektru signala, kao frekvencija koja odgovara najvećoj amplitudi u spektru za predloženi opseg. Predloženi opseg u tom slučaju predstavlja opseg širine 20 Hz na čijoj se sredini nalazi osnovna frekvencija tona, koja je određena na osnovu tabele frekvencija tonova [10]. Ovako opisana tehnika za procenu osnovne frekvencije tona daje dobre rezultate za tonove na višim frekvencijama, dok za tonove na nižim frekvencijama to nije slučaj. Razlog za loše rezultate pri proceni osnovne frekvencije nižih tonova jeste da tada u predloženom opsegu

postoji nekoliko frekvencija čije su pripadajuće amplitude sličnih vrednosti. Da bi se izbeglo pogrešno procenijavanje osnovne frekvencije u algoritmu figuriše procenjena frekvencija prvog harmonika tona. Takođe, zarad automatizacije celog algoritma za određivanje koeficijenta inharmoničnosti za celokupni opseg tonova klavira, a ne samo za tonove nižeg registra, koristi se frekvencija prvog parcijala tona.

Nakon određivanja frekvencije prvog parcijala tona signal je prozorovan *Blackman*-ovom prozorskom funkcijom. Naredni korak u algoritmu je računanje spektra prozorovanog signala pomoću FFT algoritma. Da bi frekvencijska rezolucija spektra signala bila dobra, pre računanja FFT neophodno je dopuniti niz nulama do vrednosti 2^{16} , a zatim izvršiti izračunavanje spektra signala u 2^{16} tačaka. Pre glavnog, adaptivnog dela algoritma, potrebno je izvršiti još jednu manipulaciju nad izračunatim spektrom, kako bi se postigla efikasnost u izvršavanju samog algoritma. Potrebno je smanjiti broj spektralnih komponenti. Izračunati spektar se deli na podopsege i iz svakog podopsega se vrši selekcija 10 spektralnih komponenti sa najvećim amplitudama. Širina podopsega je definisana kao $5f_1$, gde f_1 predstavlja procenjenu frekvenciju prvog parcijala tona.

Adaptivni deo algoritma prikazan je na slici 1, uokviren isprekidanom linijom. Kako bi se iterativni postupak sproveo do kraja neophodno je izvršiti četiri koraka i to: računanje devijacije frekvencije parcijala, određivanje trenda devijacije, modifikaciju estimiranog koeficijenta inharmoničnosti B i određivanje uslova za prekid izvršavanja algoritma. Kao rezultat algoritma dobija se estimirana vrednost koeficijenta inharmoničnosti B za ton klavira koji predstavlja ulazni signal.

U delu algoritma koji se odnosi na računanje devijacije frekvencije parcijala neophodno je zadati inicijalnu vrednost koeficijenta inharmoničnosti B . Kako su ispitivani tonovi iz nižeg registra klavira, vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B za taj registar kreću se u opsegu od 10^{-4} do 10^{-3} . U ovom radu kao početna vrednost koeficijenta B uzeta je vrednost 10^{-4} . Početna vrednost koeficijenta B koristi se pri izračunavanju prvog parcijala procenjene frekvencije prema izrazu (1). Zatim se vrši selekcija frekvencija parcijala tona f_k koje odgovaraju maksimalnoj amplitudi spektra unutar zatvorenog intervala. Donja granica intervala predstavlja razliku frekvencije parcijala tona f_k i pomeraja Δf , dok gornja granica intervala predstavlja zbir frekvencije parcijala tona f_k i pomeraja Δf . Za vrednost pomeraja Δf u algoritmu korišćena je vrednost $0.4f_1$. Nakon izvršene selekcije, devijacija frekvencije parcijala se dobija kao razlika frekvencije parcijala dobijene iz spektra tona i procenjene frekvencije parcijala tona f_k .

Sledeći korak iterativnog postupka je određivanje trenda devijacije. Na osnovu uspostavljenog trenda devijacije vrši se odluka da li vrednost koeficijenta inharmoničnosti B treba povećati ili ne u odnosu na inicijalnu vrednost. Kriva devijacije ne predstavlja uvek glatku krivu, već se u toku same krive mogu javiti i veći lokalni maksimumi koji značajno odstupaju od trenda krive. Kako bi se izbegao ovaj problem trend devijacije je definisan kao znak, pozitivan ili negativan. Pozitivan trend se definiše ukoliko se u nizu

vrednosti koje predstavlja devijacija frekvencije parcijala nalazi više pozitivnih nego negativnih vrednosti. Dok negativni trend predstavlja suprotnost pozitivnom trendu, odnosno kada se u nizu vrednosti devijacija frekvencije parcijala nalazi više negativnih vrednosti.

Nakon određenog trenda devijacije moguće je modifikovati vrednost koeficijenta inharmoničnosti B polaznog tona. Modifikacija vrednosti koeficijenta B se vrši množenjem sa faktorom 10^δ . Parametar δ koji učestvuje u modifikaciji predstavlja parametar čija vrednost preuzima znak trenda devijacije, odnosno ukoliko je trend devijacije pozitivan i vrednost δ je pozitivna i obrnuto. Početna vrednost parametra δ u ovom algoritmu je 1. Ukoliko dođe do situacije da dva susedna trenda devijacije imaju suprotne znake, parametar δ se modifikuje deljenjem trenutne vrednosti sa 2. Cilj množenja koeficijenta inharmoničnosti B sa faktorom 10^δ jeste u povećanju, ili smanjenju, vrednosti koeficijenta B sve do trenutka do kog kriva devijacije ne postane što zaglađenija, što predstavlja momenat konvergencije samog algoritma.

Poslednji korak iterativnog postupka predstavlja određivanje uslova za prekid izvršavanja algoritma. Empirijski je utvrđeno da je potrebno izvršiti 40 iteracija adaptivnog dela algoritma, kako bi se ostvarila konvergencija. Vrednost od 40 izvršavanja iteracija je uzeta kao univerzalan parametar na osnovu kojeg je moguće odrediti koeficijent inharmoničnosti B za celokupan opseg tonova klavira, iako je za više frekvencije tonova klavira potreban manji broj iteracija kako bi došlo do konvergencije algoritma.

Nakon postizanja konvergencije algoritma, koja se ostvaruje minimizacijom krive devijacije, rezultat algoritma predstavlja jednobrojna vrednost koeficijenta inharmoničnosti B za posmatrani ton. Te ukoliko se razmatra celokupni opseg klavira koji se sastoji od 88 tonova, kao krajnji produkt algoritma dobija se niz od 88 vrednosti koje predstavljaju koeficijent inharmoničnosti B za svaki pojedinačni ton.

III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati i njihova analiza. Algoritam za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti klavira testiran je na bazi formiranoj za potrebe ovog rada. U bazi se nalaze tonovi snimljeni na osam različitih klavira koji pripadaju celokupnom registru instrumenta.

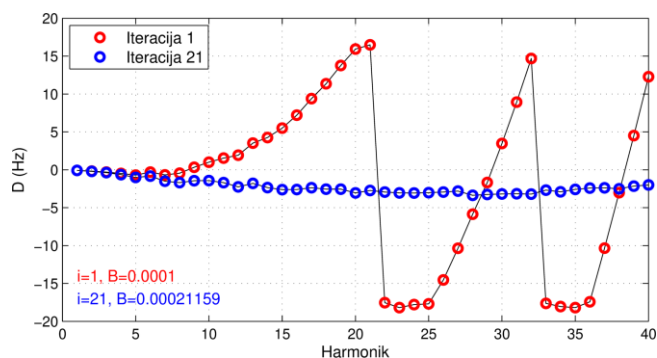
A. Baza snimaka

Za potrebe ovog rada napravljena je baza snimaka koja je korišćena u procesu računanja koeficijenta inharmoničnosti B tonova klavira. Bazu čini 704 snimaka tonova, što predstavlja celokupan opseg 8 različitih klavira. Tonovi klavira su snimljeni u prostorijama Fakulteta Muzičkih Umetnosti u Beogradu. Od 8 klavira čiji tonovi čine bazu snimaka može se napraviti njihova klasifikacija po različitim parametrima. U snimanju su učestvovala 3 koncertna klavira marke *Steinway*, od koga je jedan oznake D7, a druga dva nose oznaku D3. Pored marke *Steinway* u bazi su zastupljeni i tonovi odsvirani na tri klavira marke *Yamaha*, dva koncertna klavira tipa C7 i jedna klavinova. Takođe, snimljeni su tonovi na dva klavira

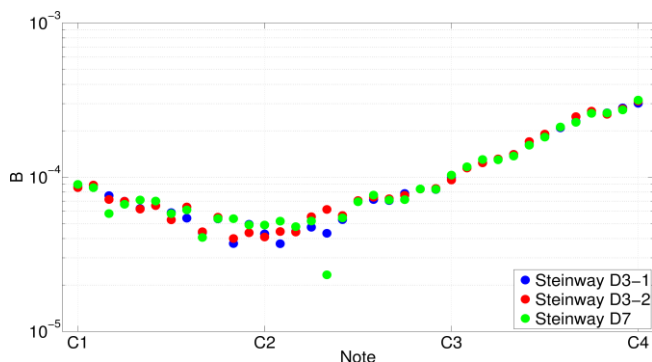
marke *Bösendorfer*. Sem na osnovu marke kojoj pripadaju klaviri se mogu klasifikovati i po njihovoj starosti i na osnovu učestalosti njihovog korišćenja. Najstariji klaviri pripadaju marki *Bösendorfer*, a njihova upotreba datira još od pedesetih godina prošlog veka. Ukoliko se govori o klasifikaciji na osnovu učestalosti sviranja klavira, postoji podela na često korišćene klavire za pripremanje i polaganje ispita na Fakultetu muzičkih umetnosti, kao što je *Steinway D7* i na nove, tek kupljene klavire koji još uvek nisu usvirani, kao što su dva koncertna klavira sa oznakom *Yamaha C7*. Ovako formirana baza snimaka je značajna za dalja istraživanja u polju muzičke akustike.

B. Analiza koeficijenata inharmoničnosti tonova klavira

Na slici 2 prikazan je trend devijacije frekvencije parcijala za jedan ton iz baze snimaka zajedno sa vrednostima izračunatog koeficijenta inharmoničnosti. Crvenom bojom obeležena je prva iteracija adaptivnog algoritma, kao i inicijalna vrednost koeficijenta inharmoničnosti B koja je korišćena u algoritmu. Plavom bojom je obeležena 21 iteracija adaptivnog algoritma koja je dobijena u trenutku u kom je postignuta konvergencija algoritma. Na osnovu slike 2 se može zaključiti da pri postignutoj konvergenciji algoritma, za većinu harmonika tona razlika između frekvencije parcijala procenjene algoritmom i frekvencije parcijala dobijene na osnovu spektra signala ne odstupaju više od 2 Hz.



Sl. 2 Trend devijacije frekvencije parcijala za dve iteracije u algoritmu

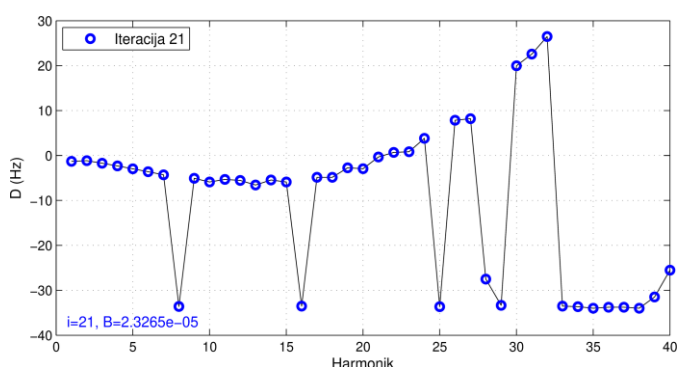


Sl. 3 Koeficijenti inharmoničnosti tonova za 3 klavira marke *Steinway*

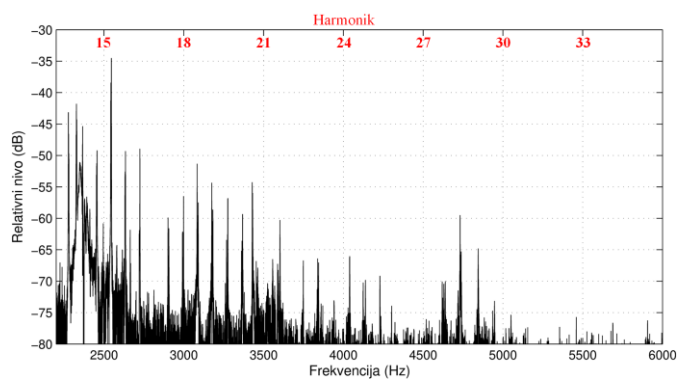
Na slici 3 prikazan je grafik koeficijenata inharmoničnosti tonova za tri klavira marke *Steinway*. Koeficijent inharmoničnosti B u ovom slučaju računat je na osnovu procenjene frekvencije sa 40 harmonika. Na osnovu slike se može zaključiti da se koeficijent inharmoničnosti B za tonove

iz treće oktave poklapaju za sva tri klavira, dok izvesne razlike u vrednostima koeficijenta inharmoničnosti nastaju za tonove iz nižeg registra.

Najveća odstupanja koeficijenta B u odnosu na generalni oblik krive zavisnosti koeficijenta inharmoničnosti B [4], od tonova iz opsega C1-C4, javljaju se za tonove G1, A#1 i E2. Za date tonove, za sva tri klavira, izvršena je detaljna analiza koja je imala za cilj da pronađe uzroke navedenih odstupanja izračunatih vrednosti koeficijenta inharmoničnosti. Na Slici 4 prikazan je izgled krive devijacije parcijala nakon 21 iteracije algoritma za određivanje koeficijenta inharmoničnosti, za ton G1 odsviran na jednom od *Steinway* klavira. Pri ovom broju iteracija trebalo bi da dođe do konvergencije algoritma, kao u situaciji prikazanoj na Slici 2. Ukoliko bi se izvršio veći broj iteracija rezultat prikazan na Slici 4 se neće popraviti, odnosno vrednost koeficijenta inharmoničnosti se neće promeniti.



Sl. 4 Vrednosti devijacije frekvencije parcijala za ton G1 odsviran na klaviru *Steinway* D7



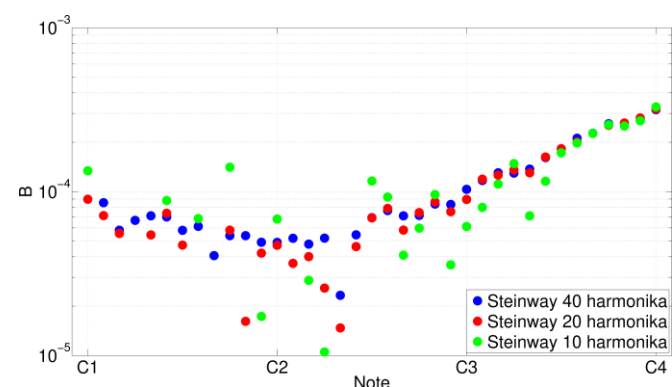
Sl. 5 Prikaz izgleda dela spektra tona G1 odsviran na klaviru *Steinway* D7

Za određenje parcijale devijacija frekvencije iznosi više od 30 Hz i za očekivati je da je to razlog zbog koga algoritam nije konvergirao. Međutim, nakon posmatranja izgleda krivih devijacija frekvencija parcijala za sve tonove, kod kojih izračunati koeficijent B ne odstupa, zaključeno je da i kod njih postoji nekoliko parcijala koji odstupaju za nekoliko desetina Hz. Glavni razlog za to što algoritam nije konvergirao je porast vrednosti devijacije frekvencije parcijala koji su iznad petnaestog harmonika. Taj porast je konstantan i javlja se do tridesetog harmonika. Na osnovu pravila za adaptiranje koraka koja su definisana u predloženom algoritmu za određivanje koeficijenta inharmoničnosti može

se zaključiti da ovakvo povećanje vrednosti devijacije frekvencije za niz uzastopnih harmonika ne može dovesti do oblika krive prikazanom na Slici 2.

Razlozi za velike vrednosti devijacije frekvencije iznad petnaestog parcijala mogu se pronaći posmatranjem spektra signala analiziranog tona. Na Slici 5 prikazan je izgled dela spektra tona kod koga se javlja veliko odstupanje koeficijenta inharmoničnosti. Na slici se uočava da pored diskretnih komponenti koje odgovaraju parcijalima postoje i komponente koje nisu celobrojan umnožak frekvencije osnovnog tona. Ovakvi fenomeni su posledica složenih graničnih uslova i prostiranja zvuka kroz zategnute žice klavira, koje mogu biti pričvršćene na razne načine. Ove komponente na višim frekvencijama javljaju se i u neposrednoj blizini parcijala od koga mogu biti i veće po amplitudi. U takvim slučajevima procena frekvenciju parcijala, koja predstavlja ulazni podatak u adaptivni algoritam, nije lako utvrditi. Ako se posmatra deo spektra u kom se nalazi 28. harmonik analiziranog tona nije jasno šta je tačna pozicija parcijala. Procena frekvencije parcijala u ovim slučajevima je pogrešna, a samim tim i izračunata devijacija frekvencije parcijala. Pošto se pogrešna procena frekvencije parcijala može desiti za više uzastopnih parcijala korišćeni algoritam ne može da pronađe vrednost koeficijenta inharmoničnosti pomoću koga bi se ova devijacija smanjila. Za parcijale iznad 33. gotovo da nije moguće odrediti maksimalnu vrednost u spektru, a samim tim ni utvrditi poziciju parcijala.

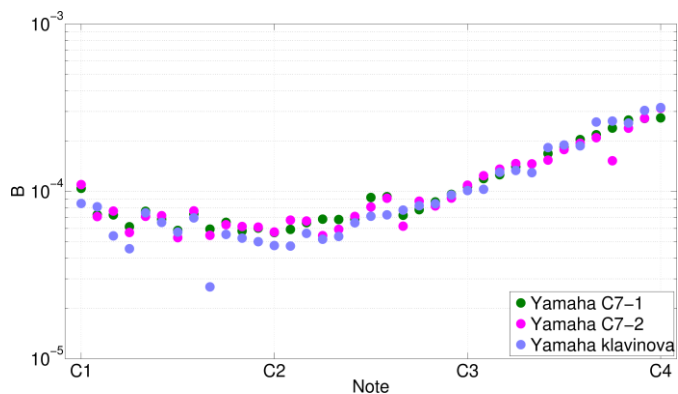
Za konvergenciju korišćenog algoritma pogodno je koristiti veći broj parcijala tona za izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti zbog numeričkog postupka u kom se posmatra razlika susednih devijacija frekvencije, odnosno što je više razlika, veće su šanse da algoritam konvergira. Sa druge strane povećanjem broja parcijala pojavljuje se problem određivanja frekvencije parcijala, koji je prethodno opisan, pa bi trebalo koristiti manji broj parcijala u adaptivnom postupku. Zbog toga je, za analizu realnih klavira potrebno pronaći kompromis između ova dva zahteva. U nastavku ovog poglavlja analiziran je uticaj broja parcijala izabranih za izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti na tačnost izračunavanja.



Sl. 6 Koeficijenti inharmoničnosti za klavir *Steinway* D7 računati sa različitim brojem harmonika

Na Slici 6 prikazane su zavisnosti koeficijenta inharmoničnosti B klavira marki *Steinway* za slučaj kada su

koeficijenti računati na osnovu procenjene frekvencije tonova sa 40, 20 i 10 harmonika. Na osnovu slika može se zaključiti da predloženi algoritam za određivanje koeficijenta inharmoničnosti daje različite vrednosti ukoliko se promeni broj harmonika na osnovu kog se procenjuje frekvencija parcijala tonova. Ukoliko se uporede vrednosti koeficijenta inharmoničnosti računane na osnovu 40 i 20 parcijala, od 37 tonova koji pripadaju prikazanom opsegu, za 33 tona dobijaju se približne iste vrednosti. Za slučaj kada se koeficijent inharmoničnosti računa na osnovu 10 parcijala postoje značajna odstupanja u vrednostima koeficijenta B . U ovom slučaju za 24 tona se dobijaju iste vrednosti koeficijenta inharmoničnosti kao kada se računa sa 40 parcijala. Tonovi za koje odstupaju vrednosti koeficijenta B računane sa 10 parcijala pripadaju tonovima nižeg registra. Takav rezultat je i očekivan jer tonovi iz nižeg registra poseduju veći broj parcijala u odnosu na tonove iz viših registara. Ukoliko postoji tendencija da se predloženi algoritam koristi kao metoda koja se odlikuje kratkim vremenom izvršavanja algoritma, moguće je računati koeficijent inharmoničnosti na osnovu 20 parcijala bez značajnijih gubitaka u tačnosti vrednosti koeficijenta B . Takođe, ukoliko su od interesa isključivo vrednosti koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira iz viših oktava, a istovremeno je poželjno kratko vreme izvršavanja algoritma, moguće je koeficijent B izračunati na osnovu 10 parcijala tona.

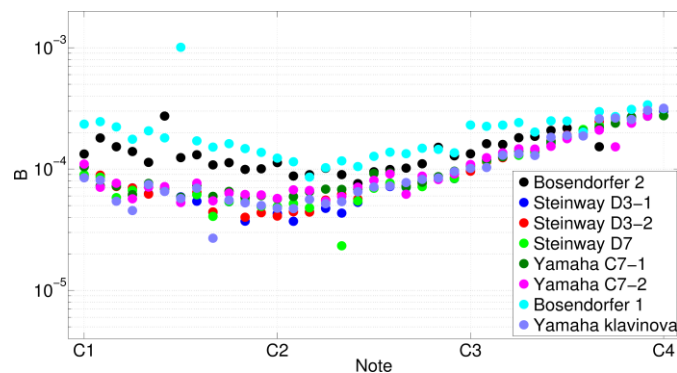


Sl. 7 Koeficijenti inharmoničnosti tonova za 3 klavira marke *Yamaha*

Na slici 7 prikazani su izračunati koeficijenti inharmoničnosti tonova za dva klavira *Yamaha C7* i jednu klavinovu marke *Yamaha*. Takođe, kao i u prethodnom slučaju koeficijent inharmoničnosti B računat je na osnovu procenjene frekvencije sa 40 harmonika. U odnosu na koeficijente B za tonove klavira marke *Steinway* koeficijenti B tonova klavira marke *Yamaha* više odstupaju u odnosu na generalni oblik krive koeficijenta inharmoničnosti. Najveća odstupanja koeficijenta B javljaju se za tonove G1, G#1, D#2, E2 i F2 za klavire *Yamaha C7-1* i *C7-2*. Uzroci ovih odstupanja su ista kao i u prethodno analiziranom slučaju i pripisuju se pogrešnoj proceni frekvencije viših parcijala iz spektra snimljenog signala klavira. Za razliku od klavira *Steinway D7* i *D3-2* klaviri *Yamaha C7-1* i *C7-2* su novi, tek kupljeni klaviri na kojima još uvek nije svirano. Na osnovu subjektivnog doživljaja prilikom snimanja tonova klavira

Yamaha C7-1 i *C7-2* uočeno je da je zvuk proizveden na ovim klavirima „zvonkiji“ u odnosu na ostale. Pijanisti sa Fakulteta Muzičkih Umetnosti su nam skrenuli pažnju da se na tim klavirima još uvek ne sviraju koncerti, već da je potrebno neko vreme razrađivanja samog instrumenta kako bi se postigla određena toplina u boji zvuka klavira. Na slici 7 nalaze se i vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za klavinovu marke *Yamaha*. Ukoliko se uporede vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za klavinovu i dva klavira iste marke sa slike, koeficijenti inharmoničnosti klavinove ne odstupaju značajnije ni za jedan ton za razliku od klavira. Jedan od razloga može biti što klavinova predstavlja digitalnu verziju klavira, čiji se mehanizam zasniva na malim metalnim čekićima, koji teže da budu iste težine kao i čekići akustičkih klavira. Takođe, za razliku od akustičkih klavira koji čekićem pobuđuju žice čekići klavinove aktiviraju digitalne senzore za pritisak koji kasnije reprodukuju zvuk.

Na Slici 8 prikazane su vrednosti koeficijenta inharmoničnosti B tonova za svih 8 klavira od interesa i tonove iz opsega C1 do C4. Iako su koeficijenti inharmoničnosti B računati za celokupne opsege klavira na graficima su prikazani samo koeficijenti koji obuhvataju tri oktave iz nižeg registra klavira zbog preglednosti grafika. Na osnovu slike se može zaključiti da postoji relativno poklapanje vrednosti koeficijenta za 6 klavira, dok najviše odstupaju koeficijenti inharmoničnosti tonova odsviranih na dva klavira marke *Bösendorfer*. Taj rezultat pokazuje da se na osnovu analize koeficijenta inharmoničnosti tonova može izvršiti klasifikacija klavira prema starosti. Takođe, s obzirom na svirački vek pomenuta dva klavira odlikuju se i činjenicom da nisu naštimovani.



Sl. 8 Koeficijent inharmoničnosti tonova iz opsega C1-C4 za 8 klavira

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je analiza tipova klavira na osnovu algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Formirana je baza snimaka koja se sastoji od preko 700 tonova odsviranih na osam različitih klavira. Snimljeni tonovi pripadaju kompletnom registru klavira. Klaviri čiji su tonovi analizirani razlikuju se na osnovu tipa, starosti i učestalosti sviranja. Pokazano je da se predloženi PFD (*Partial Frequency Deviation*) algoritam može koristiti ne samo za procenu koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira, već i za neku vrstu klasifikacije različitih klavira. Sprovedena je

komparativna analiza istih marki klavira različitih oznaka kao što su *Steinway D7* i *D3* i *Yamaha C7* i klavinova. Pokazano je da se na osnovu koeficijenta inharmoničnosti tonova moguće izvršiti poređenje tipova klavira. Takođe, izvršeno je poređenje vrednosti koeficijenta inharmoničnosti računatog na osnovu različitog broja parcijala. Koeficijent B računat je na osnovu 10, 20 i 40 parcijala. Pokazano je da ukoliko postoji tendencija za kraćim vremenom izvršavanja algoritma, moguće je proceniti koeficijent inharmoničnosti tona na osnovu 20 harmonika. Takođe, ukoliko se vrši analiza samo na osnovu tonova iz viših registara klavira moguće je izvršiti procenu koeficijenta inharmoničnosti na osnovu samo 10 parcijala posmatranih tonova. Glavni nedostatak ovog algoritma pri analizi snimaka realnih klavira predstavlja procena frekvencije viših parcijala iz spektra. Zbog pogrešne procene frekvencije javljaju se velike devijacije frekvencije parcijala koje adaptivni algoritam ne može da smanji iterativnim postupkom. Dalja unapređenja ovog algoritma ići će u pravcu implementacije metoda kojima bi se ovaj problem rešio. Izvedeni zaključci su korisni za buduća istraživanja gde će se priloženi algoritam koristiti za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti drugih žičanih instrumenata u cilju njihove klasifikacije na osnovu različitih parametara.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Zahvaljujemo se kolegama sa Fakulteta Muzičkih Umetnosti na ustupljenim muzičkim instrumentima i formiranju baze snimaka.

LITERATURA

- [1] Gerald Abraham, *The Concise Oxford History of Music*, 1979
- [2] Gleb Anfilov, *Physics and Music*, University Press of the Pacific 2001, ISBN-13:978-0898754193
- [3] John William Strutt, Lord Rayleigh, *The Theory of Sound*, Macmillan 1894
- [4] Harvey Fletcher, *Normal Vibration Frequencies of a Stiff Piano String*, 1964, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.36, No.1
- [5] Galembo, A. S., and Askenfelt, A. (1999). "Signal representation and estimation of spectral parameters by inharmonic comb filters with application to the piano," *IEEE Trans. Speech Audio Process.* 7(2), 197–203.
- [6] Askenfelt, A., and Galembo, A. S. (2000). "Study of the spectral inharmonicity of musical sound," *Acoust. Phys.* 46(2), 121–132.
- [7] Klapuri, A. (2003). "Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness," *IEEE Trans. Speech Audio Process.* 11(6), 184–194.J.
- [8] Jukka Rauhala, Heidi-Maria Lehtonen, Vesa Välimäki, *Fast automatic inharmonicity estimation algorithm* (2007), *The Journal of the Acoustical Society of America* 121, EL184, DOI: 10.1121/1.2719043
- [9] Rabiner L., *On the use of autocorrelation analysis for pitch detection* (1977), *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol.25, No.1, 24-33
- [10] *Frequency for equal-tempered scale*, dostupno na: <https://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>, pristupano 01.08.2020.

ABSTRACT

"Ideal" string that is tightened at both ends, but is not characterized by stiffness, oscillates when being triggered, creating a series of harmonics that represent integer multiplication of fundamental frequency of the string. In reality, when string is observed from the aspect of stiffness, after it is excited, the resulting harmonics will not be integer multiplication of fundamental frequency of the string, yet harmonics will have a frequency shift in relation to the harmonics of the ideal string. The phenomenon of frequency shifted harmonics is represented in all string instruments and is called inharmonicity. In this paper, implementation and usage of an algorithm for inharmonicity coefficient determination of piano tones is presented. The algorithm is based on an adaptive process that calculates the frequency deviation of tone partials from expected frequencies for a given tone. Testing of proposed algorithm was performed on realistic tones of different pianos. An analysis of inharmonicity coefficients of piano tones calculated with a different number of partials was performed. The accuracy of the algorithm was examined and cases in which the algorithm gives results that deviate from the correct ones were determined. It was found that based on the values of the inharmonicity coefficient for piano tones, it is possible to classify pianos based on their type, age and frequency of playing.

Analysis of different pianos based on algorithm for inharmonicity estimation

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac
Pavlović, Jelena Čertić

Realizacija zvučnog sistema sa softverskom kontrolom usmerenosti

Miloš Bjelić, Aleksandar Golubović, Miomir Mijić

Apstrakt— Usmereni zvučni izvori predstavljaju nezaobilazan element u realizaciji audio sistema, bilo da se radi o otvorenom ili zatvorenom prostoru koji je potrebno ozvučiti. U ovom radu prikazan je jedan usmereni zvučni izvor, čiju je usmerenost moguće kontrolisati softverski, a ne hardverski, što je slučaj kod većine dostupnih rešenja na tržištu. Zvučnički sistem se sastoji od 12 zvučnika i procesora sa isto toliko izlaza, koji omogućava nezavisnu obradu signala za svaki zvučnik ponaosob. U radu je prikazan algoritam za prostorno-vremensku obradu signala koji omogućava upravljanje dijagramom usmerenosti u vertikalnoj ravni. Algoritam je implementiran na dva različita procesora i pokazano je da se oba procesora mogu koristiti za ovu namenu. Verifikacija rada celokupnog sistema izvršena je merenjem dijagrama usmerenosti zvučnog niza u anehoičnim uslovima. U radu su prikazani i potencijalni problemi koji se mogu javiti prilikom korišćenja ovakvih sistema i načini da se ti problemi prevaziđu.

Cljučne reči— algoritmi, obrada signala, hardverska implementacija, softverska kontrola, usmerenost, zvučnički niz.

I. UVOD

Zvučnički sistemi koji se koriste u sistemima za ozvučavanje treba da prenesu zvučni sadržaj do slušalaca koji se nalaze u određenom delu prostora. Zvučna energija koja odlazi u deo prostora na kome nema slušalaca na otvorenom prostoru predstavlja gubitak, a u prostorijama ima negativne posledice na percepciju zvuka jer dodatno pobuđuje reverberacioni proces [1]. Zbog toga se u sistemima za ozvučavanje koriste usmereni zvučnički sistemi da bi se najveći deo zvučne snage slao u prostor gde se nalaze slušaoci. Usmereni zvučnički sistemi podrazumevaju da se grupa zvučnika nalazi na jednoj lokaciji i koncentrisani u jedinstven sistem. U ovu grupu zvučničkih sistema, na primer, spadaju takozvani *Line array* sistemi, kod kojih se usmerenost postiže tako što je zvučnička skupina zakrivljena, to jest pojedinačni zvučnici se nalaze na različitim udaljenostima od mesta prijema.

Realizovani zvučnički niz koji je predmet ovog rada spada u grupu usmerenih zvučnih izvora i sastoji se od grupe zvučnika postavljenih u nizu. Kod ovakvog sistema usmeravanje se ne vrši fizičkim pomeranjem u prostoru pojedinačnih zvučnika u zvučničkoj skupini, kao kod standardnih *Line array* sistema, već odgovarajućom predobradom signala, dok se zvučnici nalaze nepomično u duž fiksne ose. Svaki od zvučnika u ovom zvučničkom nizu

ima nezavisno pretprocesiranje signala i pojačanje. Time je omogućeno da se kontroliše usmerenost sistema u celini.

Glavna prednost ovakvog sistema u odnosu ostale usmerene zvučničke sisteme je u tome što se kontrola usmerenosti ostvaruje bez fizičkog pomeranja zvučnika i podešavanja uglova između njih. Druga prednost je to što se može postići veća usmerenost, odnosno bolje pokrivanje auditorijuma sa istim brojem zvučnika. Treća prednost ovakvog sistema je u tome što se usmerenost i dobro pokrivanje mogu ostvariti sa manjim fizičkim dimenzijama sistema u odnosu na *Line array* sisteme. Najzad, četvrta prednost je u tome što se modifikacije sistema vrše softverskim izmenama bez bilo kakvih hardverskih promena i pomeranja pojedinačnih zvučnika. Na taj način promene je moguće uvoditi i daljinski, preko namenske mreže ili preko Interneta.

Zvučnički stubovi sa ugrađenim pojačavačima i procesorom za predobradu signala predstavljaju osnovni element u savremenom konceptu ozvučavanja kako na otvorenom, tako i u zatvorenom prostoru. Ovakvi zvučnički sistemi su komercijalno dostupni, ali modeli koji se nude na tržištu su zatvoreni, i u njima se ne može sagledati unutrašnja logička struktura pripreme signala. Njihovi proizvođači ne dozvoljavaju uvid u rad sistema niti mogućnost samostalnog unapređivanja kroz implementaciju naprednih algoritama za obradu audio signala. To znači da sisteme koji se mogu nabaviti na tržištu nije moguće modifikovati i unapređivati, što sa istraživačkog aspekta predstavlja ograničenje. U literaturi postoje osnovne naznake o funkcionisanju takvih zvučničkih sistema, ali ne i detaljniji opisi. Uz to, cena takvih sistema je veoma visoka. Zbog toga je izrada ovakvog zvučničkog sistema istraživačko-razvojni zadatak.

U ovom radu fokus će biti na algoritmu za kontrolu dijagrama usmerenosti zvučničkog niza i njegovoj implementaciji na dva procesora različite namene i arhitekture. Jedan proces je multifunkcionalni procesor koji se koristi u audio sistemima pa je implementacija algoritama ograničena postojećim elementima na procesoru. Drugi procesor predstavlja *open source* sistem za obradu audio signala sa malim vremenom latencije, koji se može programirati u skladu sa željama korisnika. Osnovna ideja je da se uporede ova dva sistema sa stanovišta implementacije algoritma za softversku kontrolu dijagrama usmerenosti i ispita mogućnost korišćenja *open source* rešenja za tu namenu.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazani su zvučnički niz, algoritam za prostorno-vremensku obradu signala i procesori koji će biti korišćeni za implementaciju algoritama. U trećem poglavlju prikazani su rezultati i njihova diskusija. U poslednjem poglavlju izneti su zaključci.

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

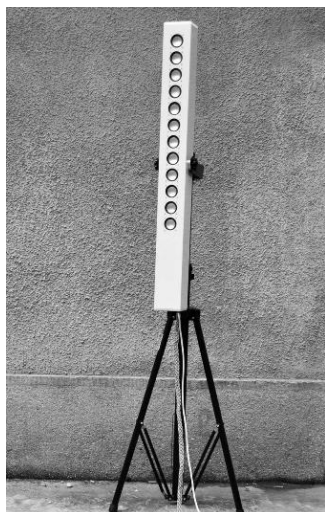
Aleksandar Golubović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: gal60477d@student.etf.bg.ac.rs).

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

II. METODOLOGIJA

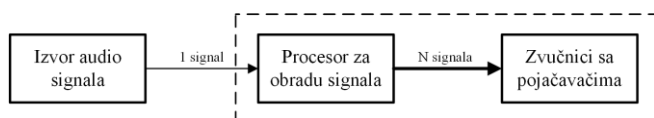
A. Zvučnički niz

Zvučnički niz koji posmatramo u ovom radu se sastoji od 12 zvučnika tipa *Genius SP-D150* sa pratećim pojačavačima i kutije u koju su smešteni zvučnici i pojačavači. Pojačavači se napajaju iz jednosmernog izvora za napajanje napona 9 V. Frekvencijska karakteristika jednog zvučnika koji je ugrađen u sistem je približno ravna na frekvencijama većim od 300 Hz. Pojačavači zvučnika su podešeni tako da vrednost nivoa zvuka na izlazu iz zvučnika bude ista za sve zvučnike kada nema obrade signala. Zvučnički niz je realizovan u Laboratoriji za Akustiku Elektrotehničkog fakulteta [2]. Na Slici 1 prikazan je izgled zvučničkog niza.



Sl. 1 Izgled korišćenog zvučničkog niza sa 12 zvučnika.

Principijelna blok šema sistema za kontrolu dijagrama zračenja zvučničkog niza prikazana je na Slici 2. Sistem se sastoji iz dva dela, multifunkcionalni procesor na kome se implementira algoritam za obradu signala i samog zvučničkog niza. Signal se iz izvora audio signala vodi se na ulaz procesora. U procesoru se ulazni signal multiplificira 12 puta i svaka kopija se dalje nezavisno procesira i prosleđuje na odgovarajući pojačavač, a odatle na zvučnik.



Sl. 2 Principijelna blok šema sistema za kontrolu usmerenosti zvučničkog sistema.

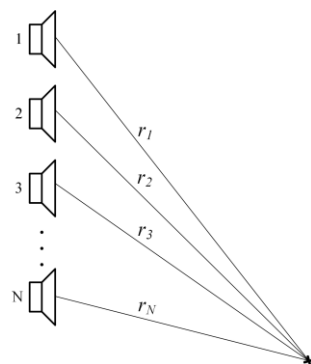
Isprekidanom linijom na Slici 2 označena je kutija zvučničkog niza. U komercijalnim rešenjima uobičajno je da se procesor nalazi u kutiji sa zvučnicima, pojačavačima i napajanjem, međutim u ovom radu korišćen je koncept da je procesor odvojen od zvučničkog niza. Razlozi su pre svega praktični, manja dimenzija kutije.

B. Algoritam za prostorno-vremensku obradu signala

Ukoliko se u procesoru signala ne izvrši obrada signala već samo kreiranje 12 kopija ulaznog signala, dobija se dijagram usmerenosti koji je posledica geometrije niza, odnosno linijskog izvora. Maksimum dijagrama usmerenosti odgovara osi normalnoj na osu na kojoj se nalaze zvučnici.

Pomeranje dijagrama usmerenosti u neki drugi pravac

realizuje se obradom signala pre reprodukcije [3]. Na Slici 3 prikazana je tačka u prostoru u koju se želi dobiti maksimum dijagrama usmerenosti. Rastojanja između pojedinačnih zvučnika i posmatrane tačke su različita, pa će i pristizanje zvuka od pojedinačnih zvučnika biti različito. To za posledicu ima razliku u fazama signala, pri čemu će se oni, nakon njihovog sabiranja u toj tački, delimično poništavati. Da bi se obezbedilo konstruktivno sabiranje signala, njihove faze moraju biti jednake u posmatranoj tački. To se postiže tako što se na osnovu razlike rastojanja između pojedinačnih zvučnika i najudaljenijeg zvučnika izračunavaju vremenska kašnjenja signala.



Sl. 3 Princip usmeravanja zvučničkog niza.

Kašnjenja se potom veštački kompenzuju u procesoru signala, tako da se u datoj tački signali koji dolaze od pojedinačnih zvučnika sabiraju u fazi. Najbliži zvučnik ima najveću vrednost veštački unetog vremenskog kašnjenja, dok je za najudaljeniji zvučnik to kašnjenje jednako 0. Vrednosti kašnjenja za pojedinačne zvučnike dobijaju se na osnovu sledeće jednačine:

$$\tau_j = \frac{r_{max} - r_j}{c}, \quad (1)$$

gde indeks j predstavlja redni broj zvučnika, r_{max} predstavlja rastojanje od posmatrane tačke do najudaljenijeg zvučnika, r_j rastojanje od tačke do svih zvučnika, a c brzinu prostiranja zvuka u vazduhu. Rastojanje pojedinačnih zvučnika od posmatrane tačke može se izračunati na osnovu sledeće jednakosti:

$$r_j = \sqrt{(x_{jzvučnik} - R \cos(\theta))^2 + (y_{jzvučnik} - R \sin(\theta))^2} \quad (2)$$

gde su $x_{jzvučnik}$ i $y_{jzvučnik}$ koordinate pojedinačnih zvučnika, R poteg od sredine zvučničkog niza do posmatrane tačke, a θ ugao koji zaklapa osa normalna na centar zvučničkog sistema i krak koji prolazi kroz posmatranu tačku.

Takođe, pored fазne razlike moguće je izvršiti kompenzaciju i po amplitudi. Najudaljeniji zvučnik će u posmatranoj tački stvarati najmanji nivo signala, pa je potrebno pre reprodukcije pojačati taj signal. Veštački uneta pojačanja srazmerna su rastojanju zvučnika od označene tačke u prostoru. Vrednosti pojačanja izračunavaju se na sledeći način:

$$A_j = \frac{r_j}{r_{min}}, \quad (3)$$

gde je sa r_{min} i r_j označeno rastojanje od posmatrane tačke u prostoru do najbližeg, odnosno do posmatranog zvučnika, respektivno.

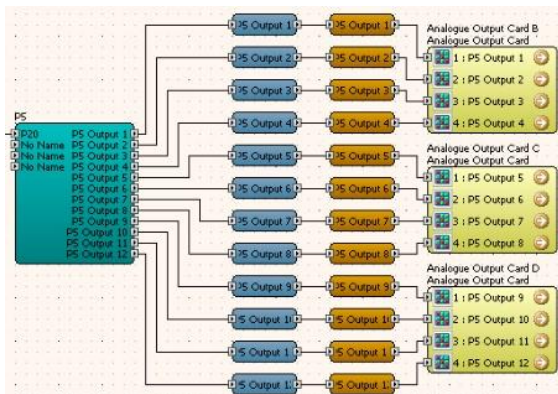
C. Implementacija algoritma na procesoru BSS Blue 160

BSS Blue 160 London Architect je multifunkcionalni procesor koji ima 4 ulazna i 12 izlaznih modula (kanala). Ovaj uređaj se koristi u audio sistemima koji pre svega zahtevaju modifikacije i nadgradnju. Omogućava jednostavnu realizaciju audio sistema jer se hardverske audio komponente realizuju kroz softverske procedure na samom procesoru. Izgled procesora prikazan je na Slici 4 [4].



Sl. 4 Izgled BSS Blu 160 procesora.

Uređaj se programira pomoću besplatnog softvera u kom je moguće dizajnirati željenu obradu signala. Samu obradu moguće je realizovati isključivo pomoću dostupnih postojećih modula. Neki od postojećih elementa su: elementi za kašnjenje, filtri, elementi za pojačanje, ekvalizeri itd. Za implementaciju opisanog algoritma potrebni su elementi za kašnjenje i elementi za pojačanje. Realizacija algoritma za usmeravanje zvučnickog niza na ovom procesoru signala prikazana je na Slici 5.



Sl. 5 Izgled realizovanog algoritma na BSS Blu 160 procesoru.

Elementima za kašnjenje i pojačanje moguće je menjati vrednosti tako da se postigne pomeranje dijagrama usmerenosti u proizvoljnom pravcu. Algoritam omogućava kontrolisanje nivoa signala sa kojim se vrši reprodukcija kao i selektovanje ulaznog signala koji se reprodukuje. Pored algoritma na procesoru, implementirani su i generator belog šuma i generator sinusnog signala, koji se koriste za testiranje sistema i merenja u kojima se zvučnički sistem koristi kao usmereni izvor.

D. Implementacija algoritma na procesoru Bela

Bela je integrisan računarski sistem koji je dizajniran za rad sa audio signalima. Bazira se na BeagleBone platformi. Glavna karakteristika ovog sistema je malo vreme latencije pri obradi analognih i audio signala, koje iznosi do 1 ms. Izgled Bela procesora prikazan je na Slici 5 [5]. Bela poseduje po 8 analognih ulaznih i 8 izlaznih modula sa frekvencijom odabiranja od 22.05 KHz. S obzirom da se posmatrani zvučnički niz sastoji od 12 zvučnika u ovom

radu su korišćena dva Bela sistema, od kojih svaki koristi 6 analognih izlaznih kanala. Synchronizacija taktova rada dva sistema je obezbeđena njihovim međusobnim povezivanjem.

Implementacija algoritma za kontrolu dijagrama usmerenosti zvučnickog niza izvršena je pomoću integrisanog razvojnog okruženja koje ovaj sistem poseduje. Razvojno okruženje je otvoreno i bazirano je na programskom jeziku C.



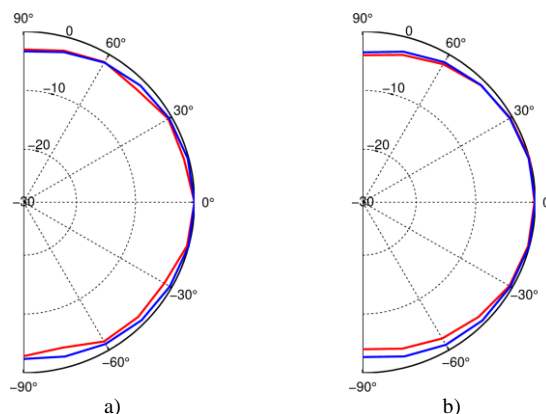
Sl. 6 Izgled Bela procesora.

Prednost ovog sistema za obradu signala u odnosu na prethodno opisani sistem, je u tome što ne postoje ograničenja definisana sa postojećim komponentama, već se obrada realizuje u kodu koji definiše sam korisnik.

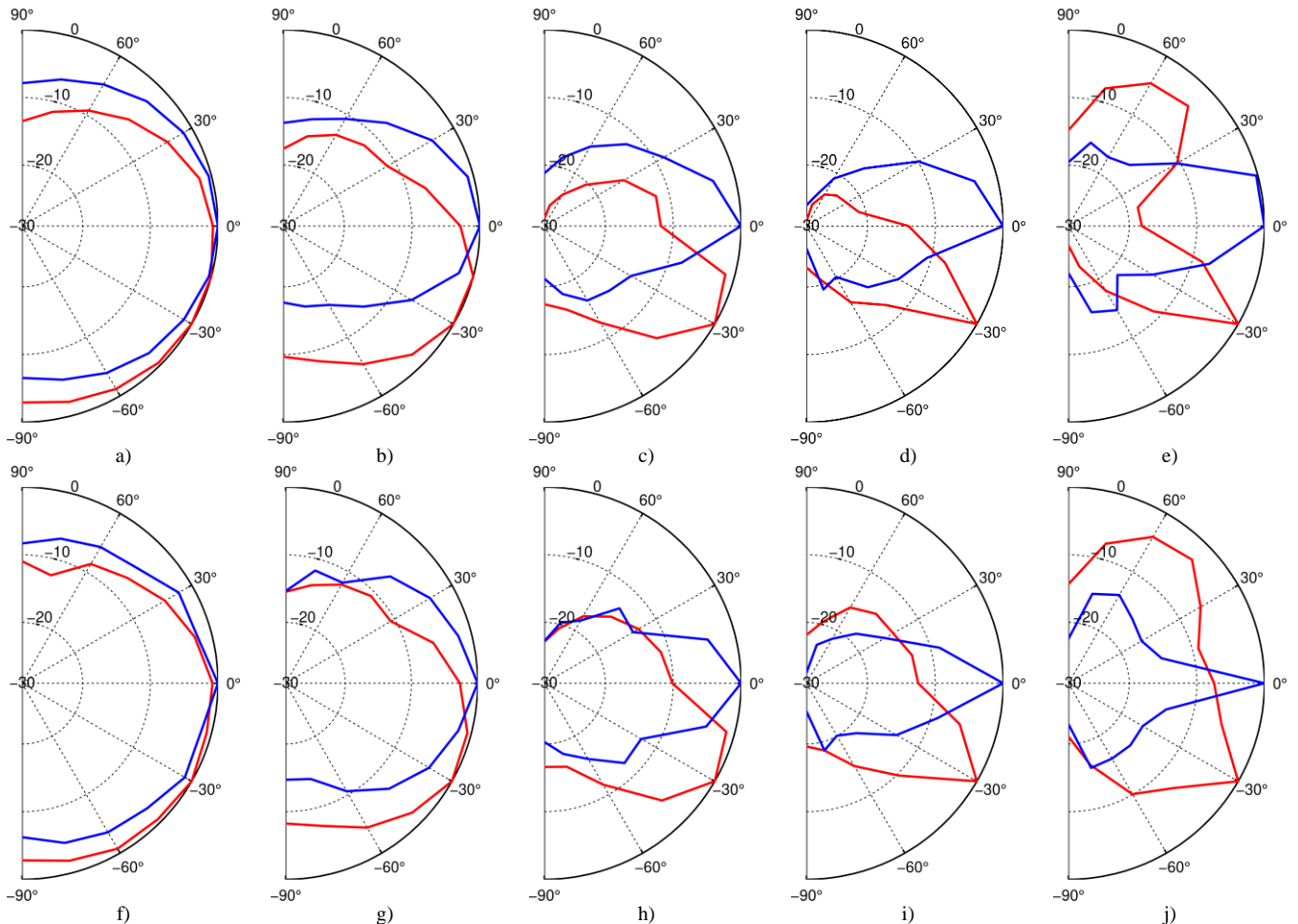
III. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati merenja dijagrama usmerenosti zvučnickog niza, usmerenog u određenoj tački u prostoru. Usmeravanje je izvršeno algoritmom opisanog u poglavlju 2. Obavljeno je merenje vertikalne i horizontalne usmerenosti sa i bez procesiranja signala, korišćenjem BSS Blu 160 procesora i Bela sistema, za oktavne opsege sa centralnim frekvencijama: 125 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz. Kao pobudni signal korišćena je MLS sekvenca [6], a samo merenje izvršeno je neusmerenim mernim mikrofonom [7] u anehoičnim uslovima. Procesiranje je izvršeno tako da se dijagram usmerenosti usmeri u pravcu -30° u odnosu na ravan u kojoj leži zvučnički stub.

Na Slici 7 prikazani su horizontalni dijagrami zračenja za oba korišćena procesora za obradu audio signala. Na osnovu rezultata merenja može se primetiti da procesiranje signala ne utiče na horizontalnu usmerenost zvučnickog niza. Ovo je posledica toga što su svi zvučnici postavljeni linijski u vertikalnoj ravni.



Sl. 7 Horizontalni dijagrami usmerenosti zvučnickog niza bez (plava boja) i sa (crvena boja) procesiranjem za oktavni opseg 1000 Hz, a) BSS Blu 160 procesoru i b) Bela procesoru



Sl. 8 Vertikalni dijagrami usmerenosti zvučnog niza bez (plava boja) i sa (crvena boja) procesiranjem signala na *BSS Blu 160* procesoru za oktavne opsege a) 250 Hz, b) 500 Hz, c) 1000 Hz, d) 2000 Hz, e) 4000 Hz i procesiranjem signala na *Bela* procesoru za oktavne opsege: f) 250 Hz, g) 500 Hz, h) 1000 Hz, i) 2000 Hz, j) 4000 Hz.

Usmerenost zvučnog niza u vertikalnoj ravni se menja uvođenjem procesiranja signala. Zbog toga je u anehoičnim uslovima izvršeno merenje dijagrama usmerenosti kada nema procesiranja, odnosno kada svi zvučnici reprodukuju isti signal, i u situaciji kada zvučnici iz procesora dobijaju nezavisne signale. Na Slici 8 prikazani su rezultati merenja dijagrama usmerenosti zvučnog niza povezanog na *BSS* i *Bela* procesor.

Uvođenjem procesiranja signala pre reprodukcije na zvučnicima postiže se rotiranje vertikalnog dijagrama usmerenosti. Pored pomeranja dijagrama usmerenosti, algoritmom se delimično menja njegov oblik. Na oktavnim opsezima ispod 250 Hz nema usmeravanja jer je na tim učestanostima talasna dužina zvuka značajno veća od dimenzija korišćenog zvučnog niza. Usmerenost se javlja za učestanosti koje su poredivne ili manje od dimenzija niza.

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 8 od a) do e) vidi se da se implementacijom algoritma za prostorno-vremensku obradu signala na procesoru *BSS* postiže usmeravanje maksimuma vertikalnog dijagrama usmerenosti u pravcu -30° . Na taj način je verifikovano da je algoritam za kontrolu usmerenosti zvučnog niza uspešno implementiran na ovom procesoru. Za niže frekvijske opsege, 250 Hz i 500 Hz, dijagram je širi jer je na tim opsezima dimenzija zvučnog niza srazmerna talasnoj dužini. Za više frekvijske opsege uočava se sužavanje dijagrama usmerenosti, ali i pojava lokalnih maksimuma u dijagramu usmerenosti, pored postojanja jednog globalnog

maksimuma (glavnog loba). Lokalni maksimumi predstavljaju bočne lobove i oni su neželjena pojava. Ova pojava je posledica ponavljanja rastojanja između pojedinačnih zvučnika. Za frekvijske opsege kod kojih je talasna dužina porediva sa ponovljenim rastojanjem pojava bočnih lobova je izražena. U ovom slučaju to je oktavni opseg sa centralnom frekvencijom 4000 Hz. Sa Slike 8 e) se može videti da je bočni lob samo 3 dB manji od glavnog loba. Problem bočnih lobova se može rešiti menjanjem geometrije zvučnog niza, ili primenom algoritama kojima se vrši potiskivanje bočnih lobova.

Na Slici 8 od f) do j) prikazani su vertikalni dijagrami usmerenosti kada je procesiranje signala izvršeno na *Bela* procesoru. Kao i za prethodno analizirani procesor dijagrami usmerenosti za sve prikazane oktavne opsege imaju maksimum u pravcu ugla -30° . Na taj način je izvršena verifikacija uspešne implementacije algoritma za kontrolu dijagrama usmerenosti na procesoru *Bela*. Na oktavnim opsezima manjim od 250 Hz nema usmeravanja zbog dimenzija niza. Poredeći ove rezultate sa rezultatima dobijenim sa procesorom *BSS* uočava se nešto širi dijagram usmerenosti. Razlike koje se javljaju za pojedine uglove su reda dB, što može biti posledica greške prilikom merenja. Merenje je izvršeno pomoću rotacionog postolja koje se podešava ručno, pa je ponovljivost takvog postupka diskutabilna. Na Slici 8 j) uočava se prisustvo jakog bočnog loba, kao i u slučaju prikazanom pod e), što je posledica geometrije korišćenog zvučnog niza.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je implementacija algoritma za kontrolu usmerenosti zvučničkog niza na dva tipa procesora. Jedan procesor predstavlja komercijalno dostupno rešenje koje se uobičajno koristi u multifunkcionalnim audio sistemima, dok je drugi procesor *open source* rešenje za obradu audio signala. Pokazano je da se na oba sistema uspešno može implementirati algoritam za prostorno-vremensku obradu signala. Merenjem u anehoičnim uslovima je potvrđeno da se dijagram usmerenosti zvučničkog niza moguće kontrolisati primenom predloženog algoritma, sa oba procesora. Imajući u vidu cenu *Bela* procesora, koja je oko 10 puta manja od *BSS Blu 160* procesora, prikazane rezultate i dodatne mogućnosti koje je moguće implementirati na ovaj procesor zaključuje se da je *Bela* procesor dobar izbor za dalja istraživanja. U radu je pokazano da algoritam nema uticaj na horizontalni dijagram usmerenosti, jer se zvučnici nalaze u vertikalnoj ravni. Korišćeni zvučnički niz, u vertikalnoj ravni, nije usmeren na oktavnim opsezima ispod 250 Hz zbog dimenzija samog niza, pa primena algoritma za obradu signala neće imati efekta. Za frekvencijske opsege iznad 250 Hz postoji usmerenost zvučničkog niza, pa je moguće uočiti rezultate obrade signala koji se dovode na pojedinačne zvučnike. Za frekvencijske opsege na kojima je talasna dužina srazmerna rastojanju između zvučnika uočava se prisustvo lokalnih maksimuma u dijagramu usmerenosti-bočni lobovi. Bočni lobovi su posledica geometrije zvučničkog niza i javljaju se kada se koriste oba procesora. Buduća istraživanja kretaće se u pravcu razvoja algoritama kojima bi se umanjio problem bočnih lobova. Taj problem može biti jako značajan u prostorima sa velikim vremenom reverberacije, gde bi značajan deo energije odlazio u deo prostora koji nije auditorijum.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori posebnu zahvalnost duguju Petru Jandriću za pomoć pruženu prilikom eksperimentalne verifikacije rada sistema.

LITERATURA

- [1] W.M. Hartmann, „Localization of sound in rooms”, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 74 (5), November 1983.
- [2] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Laboratorijski model zvučničkog stuba sa softverski kontrolisanom usmerenošću, Tehničko rešenje, 2015.
- [3] S. Chuang, K. Yoshinobu, G. Woon-Seng, Generating dual beams from a single steerable parametric loudspeaker, Applied acoustics, No. 99, 2015, pp. 43-50.
- [4] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <https://bssaudio.com/en/products/blu-160>, pristupano 28.7.2020.
- [5] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <https://bela.io/>, pristupano 28.7.2020.
- [6] A. Mitra: On the Properties of Pseudo Noise Sequences with a Simple Proposal of Randomness Test, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research and Innovation, Vol. 2, No. 9, 2008, pp. 631 – 636.
- [7] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/MiniSPL-Measurement-Microphone-Product-Data.pdf>, pristupano 28.7.2020.

ABSTRACT

Directional sound sources are a mandatory element in realization of many audio systems, whether it is an indoor or outdoor space which is being sound reinforced. This paper presents a directional sound source, the directivity of which can be controlled by software, instead of hardware, which is the case with most available solutions on the market. The sound system is comprised of 12 transducers and an audio processor with the same number of outputs, which allows for independent signal processing for each individual speaker. The paper presents the algorithm for space-time signal processing which allows beam-steering in the vertical plane. The algorithm is implemented on two different processors, and it was shown that both can be used for this purpose. The verification of the performance of the system was performed by measuring the directivity of the loudspeaker array in anechoic conditions. The paper also points out to the potential issues which can occur when utilizing this type of speakers and methods of overcoming them.

The realization of a loudspeaker system with software-controlled directivity

Miloš Bjelić, Aleksandar Golubović, Miomir Mijić

Mogućnosti poboljšanja zvučnog komfora u *Open plan* prostoru sa specifičnim ograničenjima

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić

Apstrakt— Problem obezbeđivanja zvučnog komfora u radnim prostorijama otvorenog tipa (*Open Plan Office*) u poslednjih 15 godina spada u važne inženjerske i projektantske teme. Zvučni komfor podrazumeva zadovoljavanje više aspekata, kao što su zaštita privatnosti i zaštita od uznemiravanja između ljudi koji rade u istom prostoru. Standardom ISO 3382-3 iz 2012. godine definisana je metodologija merenja i vrednovanja zvučnog komfora u prostorima ovakvog tipa. Željene karakteristike akustičkog kvaliteta u prostoriji se mogu postići sa nekoliko standardnih intervencija, poput ugrađivanja apsorpcionih materijala na plafon i bočne zidove, postavljanje slobodno visećih apsorbera ili pravljjenjem barijera između radnih mesta sa odgovarajućim izolacionim i apsorpcionim karakteristikama. U mnogim situacijama postoje određena arhitektonska rešenja koja onemogućavaju apliciranje svih potrebnih formi u enterijeru. U ovom radu su na primeru jednog prostora sa ograničenim mogućnostima za intervencije u enterijeru analizirani pojedinačnih dometi različitih intervencija. Prikazana analiza sprovedena je na bazi početnih merenja u objektu i simulacijama različitih mogućih intervencija u enterijeru.

Ključne reči— akustički dizajn, indeks privatnosti, ISO 3382-3, *open plan office*, zvučni komfor

I. UVOD

Šezdesetih godina prošlog veka dvojica nemačkih proizvođača nameštaja, Eberhard i Wolfgang Schnelle, osmislili su koncept *Open plan* kancelarija. One se mogu definisati kao mesta gde veći broj ljudi radi u fizički jedinstvenom prostoru. Autori su smatrali da princip otvorene kancelarije ima nekoliko pogodnosti, poput bolje komunikacije i protoka informacija među kolegama i između različitih odeljenja iste firme, a takođe i uštede prostora usled uklanjanja hodnika [1]. Poslednjih 15 godina ovakvi tipovi radnog prostora su sve više rasprostranjeni. U domenu projektovanja odlikuje ih fleksibilnost prostorne organizacije, mogućnost racionalizacije veličine radnih prostora i jednostavnost u prilagođavanju trenutnim potrebama rada.

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Open plan kancelarije imaju i svoje nedostatke u domenu komfora, jer u njima zaposleni trpe uticaj aktivnosti drugih osoba koje su u istom okruženju. U tome je pored privatnosti, najugroženiji zvučni komfor zbog ometanja zvukom. Ometanje nastaje zvukovima koji dolaze iz okruženja i dovoljno su glasni i razumljivi da utiču na koncentraciju zaposlenih i njihovu efikasnost u radu. Problemi nastali usled nedostatka zvučnog komfora ne baziraju se samo na žalbama usled povećanih nivoa buke, već su povezani i sa različitim negativnim ishodima poput nezadovoljstva poslom i radnim okruženjem [2,3] i smanjenom produktivnošću [4]. Zbog toga dizajn enterijera *open plan* kancelarija pored fleksibilnosti, funkcionalnosti i estetike mora obezbediti i dovoljno visok nivo zvučnog komfora.

Zvučni komfor u *open plan* prostorima u kojima radi veći broj ljudi podrazumeva istovremeno postizanje nekoliko ciljeva. Oni su uslovljeni prirodom posla koji se obavlja u prostoru, kao i brojem prisutnih ljudi. U situacijama u kojima zaposleni istovremeno komuniciraju sa klijentima ili međusobno, moraju biti zadovoljeni sledeći uslovi:

- prihvatljivi ukupan nivo zvuka u prostoriji koji omogućava održavanje koncentracije
- ostvareni uslovi privatnosti, odnosno dovoljno veliki poluprečnik distrakcije koji obezbeđuje što manje preslušavanje između različitih radnih mesta
- smanjen indeks prenosa govora između različitih radnih mesta
- kvalitetan prijem i slanje audio signala sa lokacija na kojima se komunikacija uspostavlja putem internet mreža.

Navedeni uslovi se postižu merama u domenu enterijerskih intervencija i izborom odgovarajućeg elektroakustičkog sistema za maskiranje. Najčešće enterijerske mere koje se primenjuju u cilju poboljšanja zvučnog komfora su:

1. uvođenje velikih apsorpcionih površina, pre svega na plafonu, ali i na slobodnim vertikalnim površinama i bočnim zidovima,
2. postavljanje barijera koje sprečavaju direktne putanje zvuka između pojedinih radnih mesta,
3. postavljanje apsorpcionih površina na barijerama u zoni direktnog zvuka svakog izvora.

Da bi se postigli dobri akustički uslovi u *open plan* kancelarijama potrebno je kombinovati navedene intervencije u enterijeru. Ukoliko bi se kao rešenje usvojilo samo uvođenje velikih apsorpcionih površina, time bi se smanjilo vreme reverberacije u prostoriji i ukupni nivo

zvuka kao posledica većeg broja izvora zvuka u prostoru, ali sa druge strane snižavanjem nivoa zvuka ostvaruju se uslovi za postizanje razumljivosti na većim distancama što ugrožava privatnost. Takođe, postavljanjem barijera utiče se na direktne putanje zvuka između pojedinih radnih mesta i time doprinosi smanjenju razumljivosti, ali se onda postavlja pitanje da li postavljanje barijera narušava inicijalni koncept *open plan* kancelarija.

U mnogim situacijama do rešavanja problema vezanih za zvučni komfor dolazi u etapi kada nije moguće izvesti klasične enterijerske intervencije. Takođe, nekada arhitektonska ograničenja samog prostora onemogućavaju apliciranje potrebnih formi u enterijeru, te je neophodno sprovesti optimizaciju rešenja. U ovom radu na primeru konkretnog prostora prikazane su i analizirane moguće intervencije u cilju poboljšanja zvučnog komfora. Prikazana analiza sprovedena je na osnovu početnih merenja u odabranom objektu i simulacijama različitih mogućih intervencija za zadati prostor.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazani su akustički parametri važni za *open plan* kancelarije i postavka merenja u jednom konkretnom slučaju koji je analiziran u ovom radu. U narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju su izneti zaključci do kojih se došlo u ovom istraživanju.

II. METODOLOGIJA

A. Akustički parametri *open plan* kancelarija

Akustički kvalitet *open plan* kancelarije kvantifikuje se sa nekoliko numeričkih parametara definisanih standardom ISO 3382-3 [5]. Detaljne odrednice za realizaciju merne procedure i određivanje parametara definisanih standardom mogu se naći u drugim standardima [6-9]. Parametri koji su definisani, a potrebno ih je izračunati su:

- prostorna raspodela nivoa zvučnog pritiska govora težinovanog sa A-krivom [10]. Ova kriva pokazuje kako se nivo zvučnog pritiska smanjuje u zavisnosti od rastojanja od zvučnog izvora koji emituje šum sa spektrom snage kao kod govora.
- brzina prostornog opadanja govora $D_{2,s}$, predstavlja brzinu prostornog opadanja nivoa zvučnog pritiska govora pri dvostrukom povećanju rastojanja.
- nivo zvučnog pritiska govora, sa A-koeficijentima, na rastojanju od 4 m, u oznaci $L_{p,A,S,4m}$.
- indeks prenosa govora STI (*Speech Transmission Index*) [11], predstavlja jednobrojnu vrednost koja opisuje kvalitet prenosa govora u pogledu razumljivosti.
- prostorna raspodela indeksa prenosa govora, predstavlja krivu koja pokazuje kako se STI smanjuje sa povećanjem rastojanja od zvučnog izvora.
- distanca ometanja r_D , predstavlja rastojanje od izvora na kojem STI opadne ispod vrednosti od 0.5 i izražava se u metrima [12], [13].
- distanca privatnosti r_P , predstavlja rastojanje od izvora na kojem STI opadne ispod vrednosti od 0.2 i izražava se u metrima [12], [13].
- nivo buke težinovan A-krivom $L_{p,A,B}$, predstavlja nivo zvučnog pritiska buke koja je prisutna u prostoriji za vreme radnog vremena bez osoblja.

Navedeni parametri, koji ne predstavljaju jednobrojne vrednosti, računaju se po oktavnim opsezima od 63 Hz do 8000 Hz [14]. Za procenu akustičkog komfora u *open plan* kancelarijama, od navedenih 8 parametara, najčešće se koriste sledeća 4 i to: brzina prostornog opadanja govora $D_{2,s}$, nivo zvučnog pritiska govora težinovanog sa A-krivom na rastojanju od 4 m $L_{p,A,S,4m}$, distanca ometanja r_D i nivo buke težinovan A-krivom $L_{p,A,B}$. Na osnovu Aneksa A standarda ISO 3382-3 formirana je tabela sa graničnim vrednostima pomenutih parametara pomoću koje će se izvršiti kategorizacija akustičkih uslova u *open plan* kancelarijama na dobre i loše.

TABELA I
VREDNOSTI PARAMETARA ZA DOBRE I LOŠE AKUSTIČKE USLOVE U *OPEN PLAN* KANCELARIJAMA

Naziv parametara	$D_{2,s}$	$L_{p,A,S,4m}$	r_D
Loši akustički uslovi	< 5 dB	> 50 dB	> 10 m
Dobri akustički uslovi	> 7 dB	< 48 dB	< 5 m

B. Opis eksperimentalne postavke

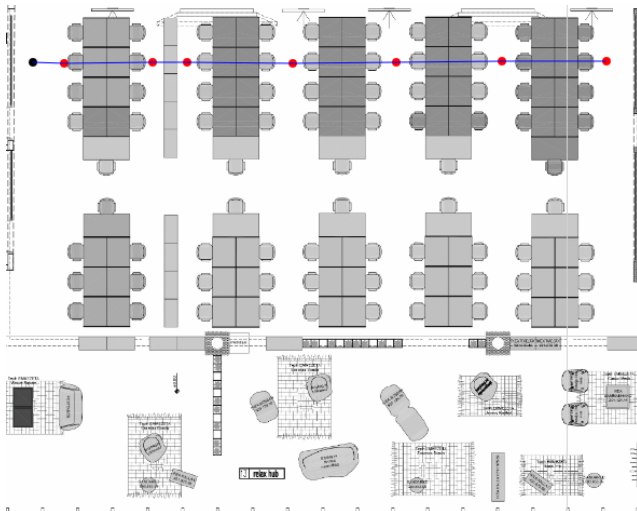
Eksperimentalna postavka ovog rada predstavlja jednu *open plan* kancelariju u kojoj nije moguće izvršiti klasične enterijerske intervencije poput postavke apsorpcionih materijala na plafon. Za ovaj prostor je karakteristično i to da u njemu radi veliki broj ljudi na relativno skućenim radnim mestima, koja se stoga ne mogu dodatno smanjivati dodavanjem izolacionih ili apsorpcionih materijala. Takođe, zbog velikog broja radnih jedinica na malom prostoru nije moguće izvršiti intervenciju u vidu postavljanja vertikalnih barijera, jer bi to ugrozilo glavni prolaz kroz kancelariju, kao i sam koncept *open plan* prostora. Na Slici 1 prikazana je analizirana *open plan* kancelarija.



Sl. 1 Izgled analizirane „*open plan*“ kancelarije

Merenje je izvršeno prateći proceduru opisanu standardom ISO 3382-3 i to u dve linije merenja, od kojih je jedna trasirana duž bočnog zida prostorije, a druga predstavlja dijagonalu od jednog do drugog kraja prostorije. Na Slici 2 prikazana je jedna linija merenja. Crvenim krugovima označena su mesta na kojima je postavljan mikrofoni, a crnim krugom je označeno mesto gde se nalazio zvučnik. Prilikom merenja prostorija mora biti prazna, bez prisustva ljudi, ali sa kompletnim nameštajem. Sve osobe,

osim lica odgovornih za vršenje merenja, moraju biti van prostorije, kako bi bilo moguće sagledati akustički kvalitet prostorije u najnepovoljnijoj situaciji. Pokazalo se da prisustvo ljudi dovodi do poboljšanja rezultata pri oceni akustičkih kvaliteta prostorije, jer utiču na prostiranje zvuka tako što poseduju određeni koeficijent apsorpcije [15]. Takođe, svi uređaji koji stvaraju pozadinsku buku, kao što su ventilacioni sistemi, moraju biti uključeni. Isključivanjem ovih uređaja pravi se greška u proceni parametara akustičkog kvaliteta prostorije u svakodnevnoj situaciji.



Sl. 2. Prikaz pozicija mernih tačaka u prostoriji

Merenje je izvršeno pomoću softvera za merenje parametara *open plane* kancelarija [16, 17], mernog mikrofona [18] i omnidirekcionog zvučnika [19]. Pri merenju ispoštovane su preporuke za rastojanja mikrofona, i to od stolova bar 0.5 m i najmanje 2 m od zidova i većih refleksionih površina. Takođe, mikrofoni i zvučni izvori postavljeni su na visinu od 1.2 m, što predstavlja prosečnu visinu ušiju čoveka koji sedi za stolom. U svakoj crvenoj tački sa slike 2 izmerena su ili izračunata 4 parametra: nivo zvučnog pritiska roze šuma u oktavnim opsezima, STI, nivo buke u oktavnim opsezima i rastojanje od zvučnog izvora. Na osnovu datih podataka izvršena je evaluacija prostora i predložene su određene enterijerske intervencije.

III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu izvršenog merenja i izračunatih parametara stekao se uvid u zatečeno stanje analizirane *open plan* kancelarije. Parametri koji opisuju zatečeno stanje su: brzina prostornog opadanja govora $D_{2,s}$, nivo zvučnog pritiska govora težinovanog sa A-krivom na rastojanju od 4 m $L_{p,A,S,4m}$ i vreme reverberacije na srednjim frekvencijama. Vrednosti parametara su navedeni respektivno: 4.09 dB, 53.6 dB i 1.28 s. Ukoliko se vrednosti parametara $D_{2,s}$ i $L_{p,A,S,4m}$ uporede sa preporučenim vrednostima iz Tabele I za dobre i loše akustičke uslove, može se zaključiti da kancelarija spada u *open plan* kancelarije sa lošim akustičkim uslovima. Takav rezultat je i očekivan s obzirom da u navedenom prostoru ne postoji nikakva akustička obrada.

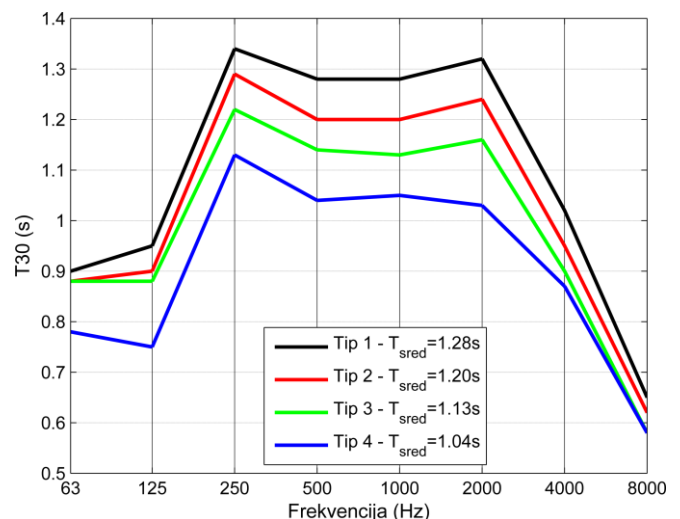
Kako bi se predložilo adekvatno rešenje akustičkog dizajna za pomenutu kancelariju napravljena je simulacija sa tri moguće enterijerske intervencije. Simulacije su

implementirane u Odeonu, softveru za akustički dizajn prostorija. Kako bi se simulacija mogla koristiti izvršeno je trimovanje softverskog modela tako da se analizirani parametri poklapaju za slučaj merenja u zatečenom stanju i softverskog modela prostorije. Tipovi intervencija koji su implementirani u softveru su:

- Tip 1: zatečeno stanje
- Tip 2: postavljane apsorpcione ploče na postojeće grede dimenzija 10 m x 0.6 m x 0.3 m
- Tip 3: kao Tip 2 sa dodatom apsorpcijom na bočnom zidu dimenzija 19 m x 2.2 m
- Tip 4: kao Tip 3 sa dodatim apsorpcionim materijalom visine 0.3 m na postojećim pregradama na stolovima.

Na slikama 3, 4, i 5 prikazani su grafici vremena reverberacije T30 u zavisnosti od frekvencije, parametar STI u zavisnosti od distance i nivo zvučnog pritiska govora težinovanog sa A-krivom na rastojanju od 4 m u zavisnosti od distance, respektivno.

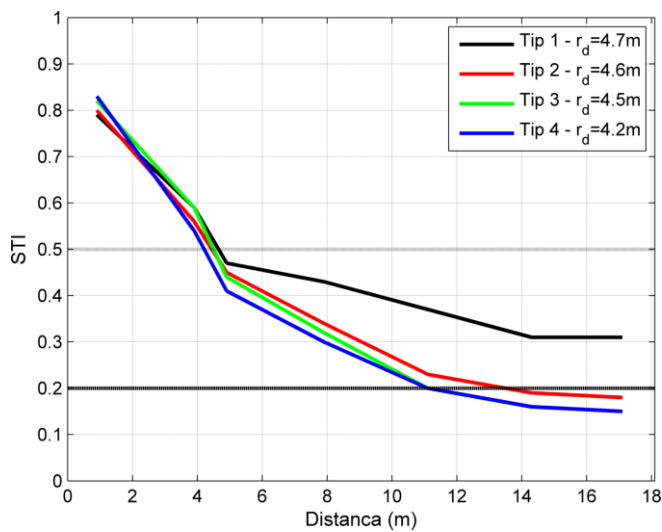
Prvi korak ka poboljšanju zvučnog komfora u prostoru je napravljen postavljanjem apsorpcionog materijala na četiri postojeće grede na plafonu. U ovom konkretnom prostoru nije bilo moguće izvršiti klasičnu intervenciju sa spuštenim plafonom i postavljanjem apsorpcionih ploča duž celog plafona, zbog postojanja radnog i dekorativnog svetla nepravilnog oblika. Sa slike 4 se može uočiti da je vrednost distance ometanja smanjena i iznosi 4.6 m. Takođe, sa slike 5 se može uočiti da je vrednost nivoa zvučnog pritiska na rastojanju od 4 m opala za 2 dB. Iako usled akustičke intervencije tipa 2 vrednost distance ometanja upada u okvire dobrih akustičkih uslova iz Tabele I, nivo zvučnog pritiska na rastojanju od 4 m i dalje ne zadovoljava preporučene granice.



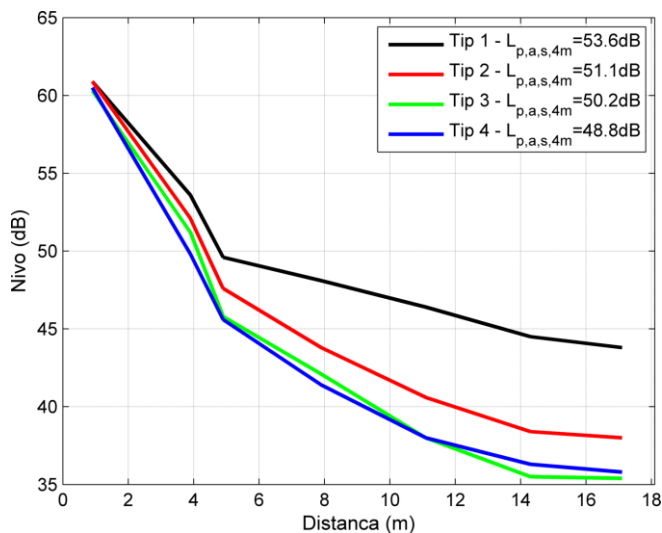
Sl. 3. Frekvencijska zavisnost vremena reverberacije za 4 tipa akustičke obrade

Intervencija tipa 3 podrazumevala je i dodatno apliciranje apsorpcionog materijala celom dužinom bočnog zida pored već obloženih greda na plafonu. Uvođenje apsorpcije na bočnom zidu dovelo je do smanjenja refleksija od bočnog zida ka radnim mestima zaposlenih. Sa slike 3 može se uočiti trend opadanja vremena reverberacije apliciranjem u prostoru veće količine apsorpcionog materijala. Takođe, na osnovu slike 5 uočava se da nivo zvučnog pritiska na 4 m

iznosi 50.2 dB, što još uvek predstavlja veću vrednost od propisane za dobre akustičke uslove.



Sl. 4. Vrednost parametra STI za usvojenu mernu liniju i 4 tipa akustičke obrade



Sl.5. Vrednost nivoa zvučnog pritiska težinovanog A-krivom na rastojanju od 4 m za usvojenu mernu liniju i 4 tipa akustičke obrade

Intervencija tipa 4 kao dodatak na intervenciju tipa 3 ima apsorpcioni materijal dodat na postojećim pregradama na stolovima. Pregrade koje postoje na stolovima su od iverice kroz koju je transmisija zvuka neizbežna. Njihova visina iznosi 0.5 m, te dodavanje apsorpcionog materijala visine 0.3 m na pregradu ne narušava koncept *open plan* kancelarije jer je ostvarena vidljivost zaposlenog sa ostatkom prostorije. Aplikiranje apsorpcije na stolove, koji predstavljaju zonu direktnog zvuka svakog potencijalnog izvora, doprinelo je smanjenju ukupne zvučne energije koja se prostire kroz ceo prostor. Sa slike 4 se može uočiti da je vrednost distance ometanja u odnosu na zatečeno stanje opala za 0.5 m. Kao posledica akustičke obrade tipa 4 postignut je odgovarajući nivo zvučnog pritiska na rastojanju od 4 m i njegova vrednost iznosi 48.8 dB. Na osnovu slike 3 može se uočiti da je vreme reverberacije opalo na vrednost od 1 s, što predstavlja optimalnu granicu za vrednost vremena reverberacije prostora ove zapremine. Prevelikim smanjenjem vremena reverberacije može doći do kontra efekta, jer se time postiže da se udaljeni govor čuje

veoma jasno što direktno utiče na povećanje distance ometanja.

Kako akustički dizajn *open plan* kancelarija ne predstavlja jednodimenzionalni problem pored prethodno analiziranih parametara, postoje još dva parametra na osnovu kojih se može utvrditi akustički kvalitet *open plan* kancelarije, a to su brzina prostornog opadanja govora $D_{2,S}$ i distanca privatnosti r_p . U Tabeli II prikazane su njihove vrednosti za sva četiri tipa akustičke obrade datog prostora.

TABELA II
VREDNOSTI PARAMETARA PROSTORNOG OPADANJA GOVORA I DISTANCE PRIVATNOSTI

	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
$D_{2,S}$ (dB)	4.09	5.69	6.1	6.25
r_p (m)	/	13.8	11	11

Na osnovu vrednosti iz Tabele II za parametar prostornog opadanja govora $D_{2,S}$ može se zaključiti da i nakon apliciranja akustičke intervencije tipa 4 dati parametar neće premašiti vrednost koja odgovara dobrim akustičkim uslovima *open plan* prostora. Zadovoljavajući rezultat u slučaju brzine prostornog opadanja bi bio ostvaren jedino postavljanjem vertikalnih stojećih barijera između dva susedna reda stolova. U ovom slučaju takva intervencija nije moguća zbog veličine samog prostora, a direktno se suprostavlja inicijalnom konceptu *open plan* kancelarija. Vrednosti parametra distance privatnosti za slučaj tipa 1 bez akustičke obrade ne postoji, jer u pomenutom prostoru vrednost STI nikad neće dostići vrednosti manju ili jednaku 0.2. Na osnovu nepromenjene vrednosti distance privatnosti za tipove 3 i 4 može se zaključiti da to predstavlja optimalan rezultat za konkretan prostor, jer se dužina od 11 m nalazi otprilike na sredini dužine celog prostora. Tumačenje vrednosti r_p od 11 m u ovom konkretnom slučaju je to da zaposleni koji sede u prvom redu neće svojim govorom ometati svoje kolege koje sede tek u petom redu.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazane su različite mogućnosti za poboljšanje zvučnog komfora u jednom posmatranom *open plan* prostoru sa nekim specifičnim ograničenjima. Na osnovu parametara definisanih standardom ISO 3382-3 sprovedena je analiza datog prostora, kao i analiza različitih enterijerskih intervencija u cilju poboljšanja akustičkog kvaliteta prostora. Pomoću softvera za merenje parametara *open plan* kancelarija izvršeno je merenje na osnovu kog je tumačeno zatečeno stanje u objektu. Analiza relevantnih parametara *open plan* kancelarija izvršena je na osnovu implementiranih simulacija četiri tipa akustičke obrade prostora. Simulacije su izvršavane u softveru za akustički dizajn prostorija. S obzirom da akustički dizajn *open plan* kancelarija ne predstavlja jednodimenzionalni problem sprovedena je komparativna analiza 6 parametara za sve tri predložene građevinske intervencije. Najbolje performanse *open plan* kancelarije su ostvarene apliciranjem akustičke obrade pod nazivom tip 4. Akustička obrada tipa 4 podrazumeva intervenciju u vidu postavljanja apsorpcionog materijala na: grede na plafonu, bočni zid i postojeće pregrade na stolovima. Pokazano je da iako svaki parametar za sebe predstavlja validan deskriptor za akustički kvalitet

prostora, neophodno je posmatrati združeno dejstvo minimum tri parametra i to: vreme reverberacije na srednjim frekvencija, distancu ometanja i vrednost nivoa zvučnog pritiska težinovanog A-krivom na rastojanju od 4 m. Dok se parametri kao što su brzina prostornog opadanja govora $D_{2,S}$ i distanca privatnosti r_P mogu koristiti kao korekcionni ili validacioni faktori sprovedenog akustičkog dizajna u prostoru.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Hundert, A.T., & Greenfield N.(1969). Physical space and organizational behavior: A study of an office landscape. *Proceedings of the 77th Annual Convention of the American Psychological Association (APA)*
- [2] Sundstrom E, Town JP, Rice RW, Osborn DP, Brill M., Office noise, satisfaction and performance. *Environ Behav* 1994; 26:195-222.
- [3] Haapakangas A, Helenius R, Keskinen E, Hongisto V. Perceived acoustic environment work performance and well-being-survey results from Finnish offices. In: 9th International congress on noise as a public health problem (ICBEN); July 2008.p. 21-5.
- [4] Banbury SP, Berry DC. Office noise and employee concentration: identifying causes of disruption and potential improvements. *Ergonomics* 2005; 48: 25-37
- [5] ISO 3382-3, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Open plan offices, 2012.
- [6] ISO 3743-1, Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for small movable sources in reverberant fields — Part 1: Comparison method for a hard-walled test room
- [7] ISO 3743- 2, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields – Part 2: Methods for special reverberation test rooms
- [8] ISO 3745, Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms
- [9] ANSI S 3.5-1997 (R 2007), Methods for the calculation of the speech intelligibility index
- [10] Houtgast, T., Steeneken, H.J.M. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *J. Acoust. Soc. Am.* 1985, 77(3), pp. 1069-1077
- [11] Guidance on computer prediction models to calculate the speech transmission index for BB93. Version 1.0. Department for Education and Skills, Schools Capital and Building Division, 2004
- [12] Hongisto, V. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air* 2005, 15(6), pp. 458-68
- [13] Virjonen, P., Keränen, J., Hongisto, V. Determination of acoustical conditions in open plan offices — Proposal for new measurement method and target values. *Acta Acust. Acust.* 2009, 95, pp. 279-290

- [14] ANSI S1.11: „Specification for Octave, Half-Octave, and Third Octave Band Filter Sets”, 49 CFR 227, jun 2009.
- [15] Chu, W.T., Warnock, A.C.C. Measurements of sound propagation in open offices. Ottawa: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, 2002. (IRC Internal Report IR-836.) Available (viewed 2011-12-21)
- [16] Stevanović, M. Bjelić, T. Miljković, M. Mijić, Softver za merenje akustičkih parametara u prostorima open plane kancelarija, 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 20-22 March 2019, 178-183, ISBN 978-99976-710-2-8
- [17] Stevanović, M. Bjelić, T. Miljković, M. Mijić, Software for Measuring Acoustic Parameters in Open-plan Offices, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, Vol. 3, No. 2, 2019, 45-53, DOI 0.7251/IJEEC1902045S.
- [18] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/MiniSPL-Measurement-Microphone-Product-Data.pdf>, pristupano 28.7.2020.
- [19] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/omni-power-light-4292>, pristupano 28.7.2020.

ABSTRACT

The problem of providing acoustic comfort in open plan workplaces (Open Plan Office) in the last 15 years is one of the important engineering and design topics. Acoustic comfort involves satisfying multiple aspects, such as protecting privacy and protecting against harassment between different entities working in the same space. The standard ISO 3382-3 from 2012 defines the methodology for measuring and evaluating acoustic comfort in spaces of this type. The desired characteristics of acoustic quality in the room can be achieved with several standard interventions in the space, such as installing absorbent materials on ceilings, side walls, installing free-hanging absorbers or creating barriers with appropriate insulation and absorption characteristics between workplaces. In many situations, there are certain architectural solutions that make it impossible to apply all the necessary forms in the interior. In this paper, on the example of one space with limited possibilities for interior interventions, the ranges of different individual interventions are analyzed. The presented analysis was performed on the basis of initial measurements in the building and simulations of various possible interventions in space.

Possibilities of improving acoustic comfort in Open plan space with specific limitations

Tatjana Miljković, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić

Studija stanja ugroženosti Beograda bukom iz ugostiteljskih objekata

Miomir Mijić, Aleksandar Milenković, Danica Boljević, Damir Savković, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt — Masovno ugrožavanje bukom iz ugostiteljskih objekata dobro je poznat ekološki problem u Beogradu. Buka koju oni stvaraju najvećim delom potiče iz uređaja za reprodukciju muzike. Međutim, problem je kompleksniji jer činjenica da su takvi objekti mesto okupljanja većeg broja ljudi, i to dominantno u noćnom periodu, donosi ugrožavanje bukom i zbog žamora i drugih zvučnih pojava koje to prate. U ovom radu prikazani su neki rezultati studije koja ima za cilj sagledavanje tog problema i predlaganje postupaka koji taj problem mogu da umanje. U radu je prikazana prostorna distribucija ugostiteljskih objekata koji su u proteklih četiri godine bili predmet žalbi inspekcijске službi i analiza rezultata dobijenih kontrolnim merenjima buke koja su u istom periodu obavljena po nalogu inspektora.

Ključne reči—buka, ugostiteljski objekti, uznemiravanje

I. UVOD

Buka u životnoj sredini definiše se kao neželjeni zvuk nastao od različitih vrsta zvučnih izvora. Jedan od glavnih izvora buke u životnoj sredini, pored puteva i železnica, jesu susedi. U urbanoj sredini specifična kategorija izvora buke „iz susedstva“ su prostori i instalacije ugostiteljskih objekata kao što su restorani, kafići, klubovi i slične vrste mesta okupljanja ljudi [1].

Buka koju stvaraju ugostiteljski objekti apostrofira se kao jedan od najznačajnijih ekoloških problema u Beogradu koji utiče na kvalitet realnog života u gradu. Svakom stanovniku Beograda poznato je da postoji mnoštvo ugostiteljskih objekata koji su mesta okupljanja manjih ili većih grupa ljudi u dokolici, ali i mesta na kojima se manje ili više glasno reprodukuje ili uživo izvodi muzika raznih žanrova. Mnogi od takvih objekata imaju bašte, pa se tokom toplog perioda

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Aleksandar Milenković – Institut za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: aleksandar.milenkovic@institutims.rs).

Danica Boljević – Institut za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: danica.boljevic@institutims.rs).

Damir Savković – Institut za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: damir.savkovic@institutims.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: mt173222m@tm.etf.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

godine muzika reprodukuje ili izvodi praktično u spoljašnjoj sredini. Za stanare u okolini muzika tada postaje buka koja ometa normalan život, pogotovo noću.

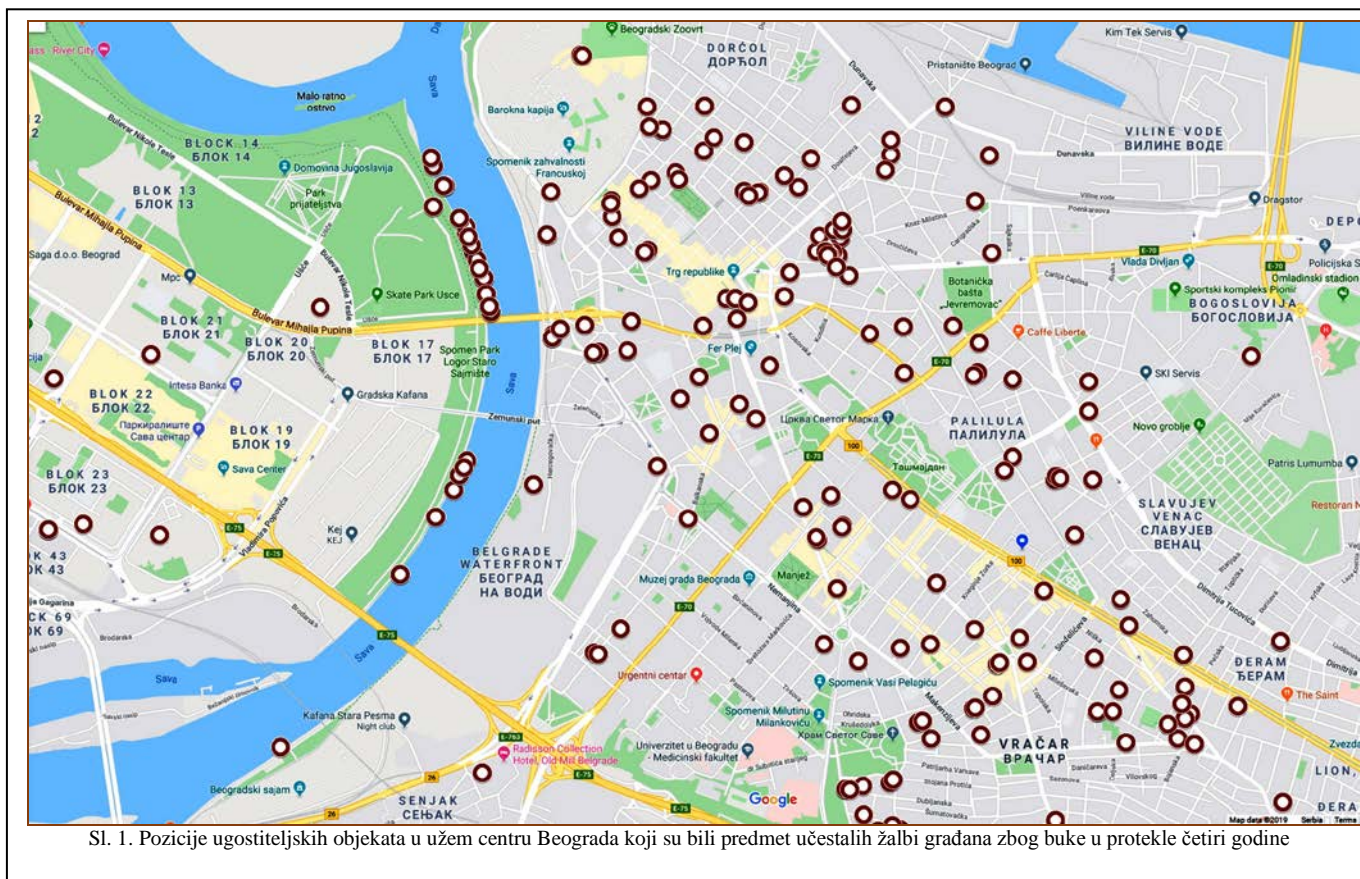
Muzika nije jedina zvučna komponenta koja prati rad ugostiteljskih objekata, jer postoje i drugi aspekti njihovog rada koji mogu biti izvor uznemiravanja okoline zvukom. To su u prvom redu objekti koji primaju veći broj ljudi i kod kojih je uobičajeno da se deo njegovog intenzivnog unutrašnjeg sadržaja neformalno preliva na ulicu oko ulaza. To povlači za sobom povećani nivo žamora u neposrednom okruženju, manevre automobila i druge zvučne manifestacije rada takvih objekata. Takođe, registrovani su slučajevi u kojima je uzrok uznemiravanja stanovništva bio neophodni mašinski sistem za ventilaciju i klimatizaciju ugostiteljskog objekta ili kuhinjski ventilator. Iz toga proizilazi činjenica da uznemiravanje okoline bukom iz ugostiteljskog objekta može postojati i kada se u njemu ne izvodi, odnosno ne reprodukuje muzika. Činjenica da je radno vreme mnogih ovakvih objekata dominantno u noćnim satima doprinosi značaju problema.

Prepoznajući ozbiljnost problema buke iz ugostiteljskih objekata u Beogradu, posebno u letnjim mesecima, Sekretarijat za zaštitu životne sredine grada Beograda inicirao je izradu studije koja treba da šire analizira taj problem i predloži neka rešenja. U projektu združeno učestvuju istraživači Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Laboratorije za akustiku i vibracije Instituta za ispitivanje materijala Srbije i Sabračajnog instituta CIP. U ovom radu prikazani su neki interesantni i znakoviti rezultati koji su do sada proizašli iz sprovedenih istraživanja.

II. OPŠTA SLIKA UGROŽENOSTI BEOGRADA BUKOM IZ UGOSTITELJSKIH OBJEKATA

Istraživanje postojećeg stanja ugroženosti stanovništva i životne sredine bukom iz ugostiteljskih objekata na teritoriji grada Beograda realizovano je sintezom informacija dobijenih iz izvora gde se evidentiraju pritužbe građana na tu vrstu ekološkog zagađenja. U prvom redu to su informacije o pritužbama koje postoje u arhivi Sekretarijata za inspekcijске poslove grada Beograda. Takođe važan izvor podataka je i arhiva sa rezultatima kontrolnih merenja buke ugostiteljskih objekata koja se obavljaju po zahtevu inspekcijске službe.

Rezultat takve sinteze prikazan je na slici 1. Na mapi Beograda označeni su ugostiteljski objekti koji su bili predmet žalbi građana zbog buke u protekle četiri godine, koliki je bio vremenski obuhvat arhivskih podataka stavljenih na



raspolaganje istraživačima. Pošto su korišćeni podaci prikupljeni u dužem vremenskom periodu, pozicije nekih označenih ugostiteljskih objekata označenih na mapi ne odgovaraju njihovoj trenutnoj poziciji jer su oni u međuvremenu preseljeni ili su iz nekih razloga prestali sa radom. Karakterističan slučaj preseljenja objekata je izmeštanje grupe splavova sa leve obale Save između Brankovog mosta i Gazele na druge pozicije. Sa prikazane mape se može videti da ugostiteljski objekti koji su zabeleženi kao uzrok pritužbi na uznemiravanje bukom imaju skoro ravnomernu raspodelu po teritoriji grada. Sa mape se takođe može videti da postoji nekoliko zona grada u kojima je njihova prostorna koncentracija relativno velika. Mnogi od njih su u nekim periodima višestruko prijavljivani kao izvori uznemiravanja bukom, o čemu prikaz sa slike 1 ne sadrži informacije.

Sasvim je sigurno da prikaz na mapi sa slike 1 ne predstavlja potpunu sliku stanja ugroženosti bukom jer je baziran samo na onim objektima za koje su se građani obraćali inspekcijskoj službi tražeći pomoć za rešavanje problema, i za koja su vršena kontrolna merenja buke. Realno je pretpostaviti da postoje i drugi ugostiteljski objekti koji ugrožavaju svoju okolinu bukom, ali to sticajem nekih okolnosti nije bilo formalizovano pritužbama koje bi bile evidentirane i koje bi porenule proces kontrole merenjem.

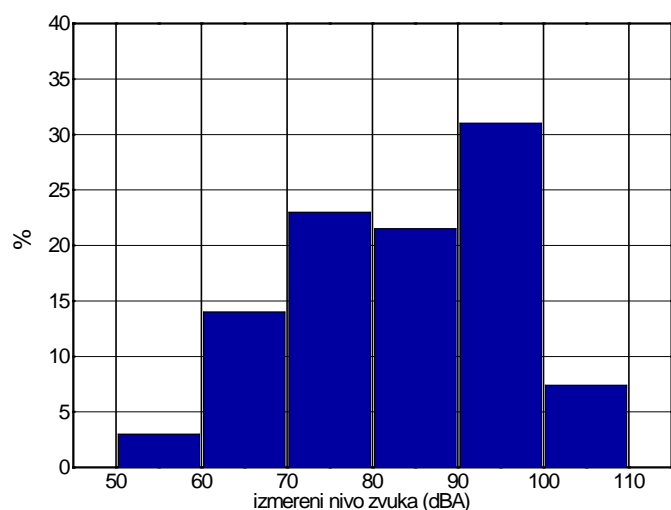
III. KARAKTERIZACIJA UGOSTITELJSKIH OBJEKATA KAO IZVORA BUKE

Karakterizacija ugostiteljskih objekata kao izvora buke na

teritoriji grada Beograda i utvrđivanje postojećeg stanja ugroženosti stanovništva i životne sredine tom bukom realizovani su koristeći rezultate kontrolnih merenja sprovedenih po nalogu inspekcijске službe. Merenja buke su vršena unutar i u okolini objekata koji su naznačeni na slici 1. Sva merenja su obavljena prema zahtevima inspektora za zaštitu životne sredine, kao i prilikom obavljanja redovne delatnosti kontrole buke (zatečeno stanje izvora buke). Sva merenja nivoa buke izvršena su prema standardima SRPS ISO 1996-1 i SRPS ISO 1996-2 [2,3]. Pri svakom merenju na licu mesta su određeni dominantni izvori čija je buka bila predmet merenja. U svim slučajevima je utvrđeno da buka dominantno nastaje radom elektroakustičkih izvora zvuka instaliranih u ugostiteljskim objektima.

Za karakterizaciju ugostiteljskih objekata kao izvora buke može poslužiti podatak o nivou zvuka u njihovoj unutrašnjosti. Na slici 2 zbirno je prikazana statistika svih izmerenih vrednosti nivoa zvuka u unutrašnjosti ugostiteljskih objekata na koje postoje pritužbe građana i koji su označeni na mapi sa slike 1. Merenja su vršena približno na pozicijama gde se mogu nalaziti gosti u objektu. Sa dijagrama se vidi da se po ovom kriterijumu ugostiteljski objekti grubo mogu klasifikovati prema merodavnom nivou zvuka podeljenom u intervale od po 10 dB. Vidi se da je u nešto preko 20% objekata nivo u njima bio u intervalu A ponderisanih vrednosti od 70 dB do 80 dB. Prema dokumentu SRPS U.J6.201 [4] sa ovakvim stanjem nivoa zvuka unutrašnjost takvih ugostiteljskih objekata spada u kategoriju bučnih prostorija koje zahtevaju pojačanu zvučnu izolaciju,

pri čemu se nivo zahtevane izolacije mora odrediti proračunom, to jest projektom.



Sl. 2. Statistika izmerenih nivoa zvuka unutar ugostiteljskih objekata u kojima su vršena kontrolna merenja buke zbog žalbi građana

Posebno značajan podatak koji se očitava sa dijagrama sa slike 2 je činjenica da u skoro 60% ugostiteljskih objekata prepoznatih u njihovom okruženju da su izvor buke izmereni nivo premašuje A ponderisanu vrednost 80 dB. Prema dokumentu SRPS U.J6.201 [4] prostorije sa ovakvim stanjem nivoa zvuka spadaju u kategoriju vrlo bučnih prostorija. Za njih se ne navode numerički uslovi za pregradne elemente koji ih ograđuju i kojim se postiže zvučna izolacija, već se zahtevaju posebne mere definisane projektantski na osnovu sprovedenih proračuna.

Dijagram sa slike 2 takođe pokazuje da postoje ugostiteljski objekti u kojima su elektroakustički izvori stvarali nivo zvuka koji je u trenutku merenja premašivao A ponderisanu vrednost 100 dB. Takvih je bilo oko 7% od svih registrovanih ugostiteljskih objekata koji su bili premet analize. Svi oni su opremljeni moćnim sistemima za ozvučavanje koji omogućavaju stvaranje visokih nivoa zvuka, i ta mogućnost je očigledno zdušno korišćena u njihovom radu.

Pojava ekstremno visokih nivoa muzičkog zvuka namenjenog nekim slušaocima ima kompleksnu genezu jer proističe iz domena današnjih shvatanja muzike i njene estetike. To je tema koja svakako izlazi iz tehničkog domena i okvira objektivne analize kojom se bavila ova studija. Činjenica je da danas, pre svega među mladom populacijom, masovan je zahtev i želja da se muzika percipira pri veoma glasnoj reprodukciji. Nesumnjivo je da pri takvim uslovima slušanja nestaju mnoge suptilne dimenzije muzike, ali se verovatno otvaraju neki drugi komunikacioni kanali kojim se primaju informacije. Nije jednostavno objasniti takvo shvatanje estetike muzičkog zvuka, pa to ostaje za neke buduće studije iz domena psihologije muzike.

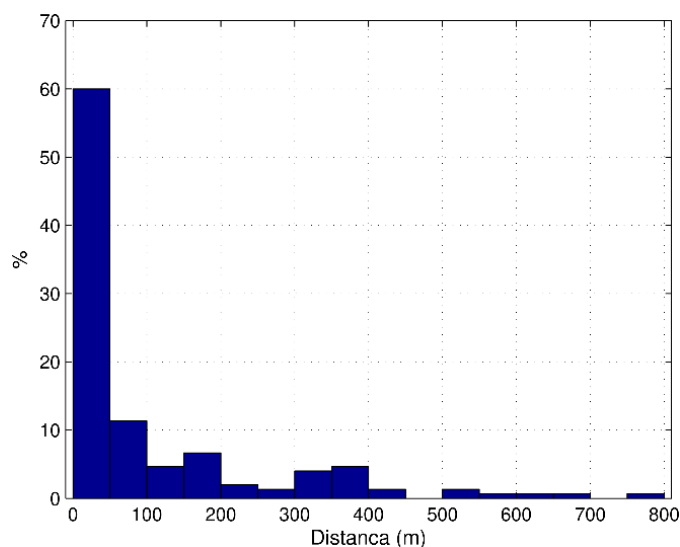
IV. ANALIZA BUKE UGOSTITELJSKIH OBJEKATA NA POZICIJAMA SA KOJIH JE PRIJAVLJENO UZNE MIRAVANJE

Stanje ugroženosti životne sredine bukom iz ugostiteljskih objekata utvrđivano je merenjem nivoa zvuka u zoni njihovog uticaja, i to:

- u zatvorenom prostoru (u sobi referentnog stana ili stana podnosioca prijave za uznemiravanje),
- na fasadi ugroženog objekta.

Dobijeni rezultati analizirani su na različite načine.

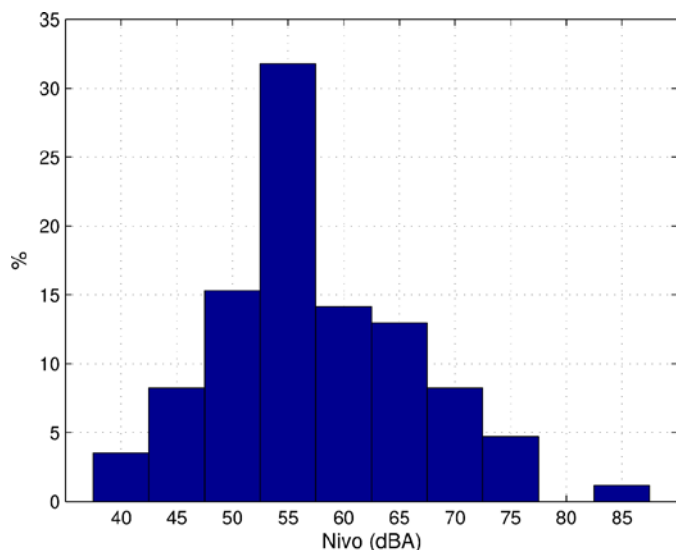
Na slici 3 prikazana je statistička raspodela distanci između ugostiteljskih objekata koji su bili izvor uznemiravanja bukom i kontrolnih mesta gde je prijavljeno uznemiravanje. Najveći broj pritužbi na ometanje bukom poticao je sa mesta koja se nalaze u neposrednoj blizini izvora (često u istom građevinskom objektu, kao što je na primer stan neposredno iznad prostora ugostiteljskog objekta, ili preko puta), ili na distancama koje su do nekoliko desetina metara. Sa dijagrama se vidi da se čak 60% svih pritužbi odnosi na distance do 50 m. Na tako malim rastojanjima od zvučnog izvora i pri visokim nivoima zvučne pobude koje pokazuje slika 2 postojeći nivo zvučne izolacije u zgradama očigledno ne može da spreči uznemiravanje bukom. Oko 80% mesta na kojima je prijavljeno uznemiravanje nalazi se na distancama do 200 m od izvora buke. Karakteristično je da postoje i registrovani slučajevi uznemiravanja bukom na većim distancama, do čak 800 m. To su slučajevi koji se odnose na ugrožavanje bukom iz splavova sa noćnim klubovima postavljenim duž leve obale Save, tamo gde postoji njihova optička vidljivost i na većim distancama. Tome doprinosi specifična konfiguracija terena u Beogradu na desnoj obali Save, što znači prekoputa splavova. Teren u toj zoni ima amfiteatralni oblik koji omogućava optičku vidljivost, a time i čujnost, i na većim distancama,.



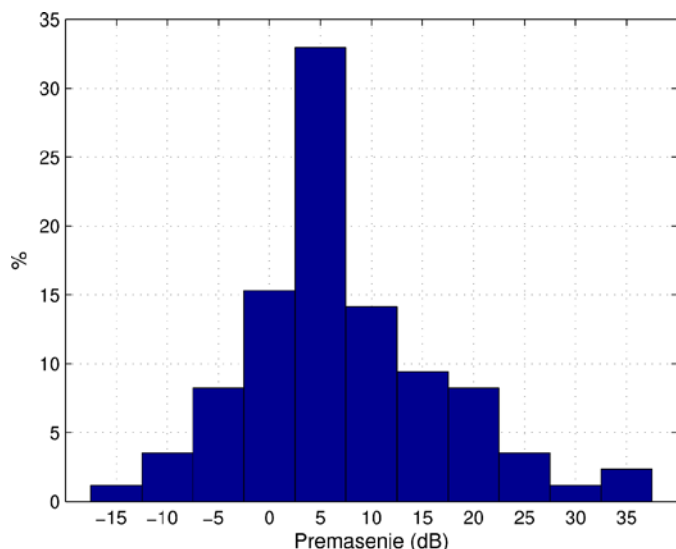
Sl. 3. Statistička raspodela distanci između ugostiteljskih objekata koji su bili izvor buke i kontrolnih mesta gde je prijavljeno ometanje bukom

Na slici 4 prikazana je raspodela izmerenih vrednosti nivoa buke na mestu kontrolnog merenja, to jest na mestu sa koga je prijavljeno ugrožavanje bukom iz nekog ugostiteljskog

objekta kao izvora. Vrednosti na osnovu kojih je nacrtan dijagram prikazan na slici 4 izmerene su na otvorenom prostoru u blizini fasade objekta koji je ugrožen. Vidi se da je na najvećem broju lokacija izmereni merodavni A ponderisani nivo buke oko 55 ± 2 dB. Na nekim pozicijama izmerena vrednost merodavnog nivoa buke prevazilazila je 80 dBA. Takođe na blizu 30% lokacija izmereni A ponderisani nivo bio je manji od 52 dB.



Sl. 4. Raspodela nivoa buke izmerenih na kontrolnim pozicijama sa kojih je prijavljeno ugrožavanje bukom

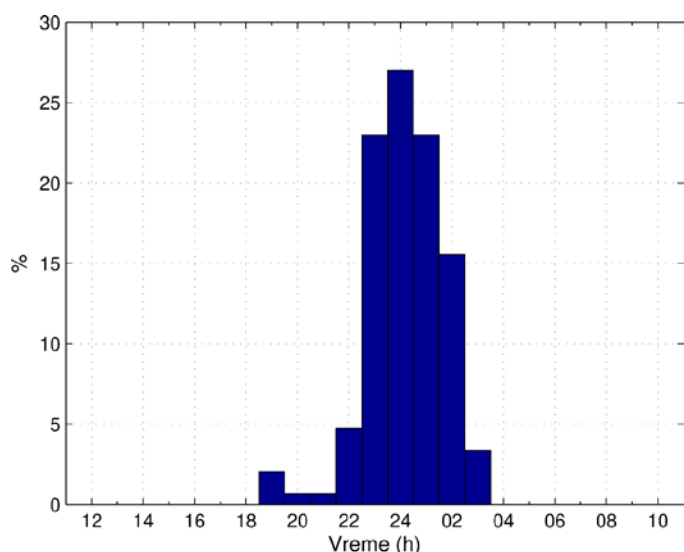


Sl. 5. Premašenje nivoa buke izmerenog na kontrolnoj poziciji u odnosu na dozvoljeni nivo za akustičku zonu u kojoj se nalazi

Da bi se olakšalo tumačenje ovakvih rezultata izračunate su veličine premašenja vrednosti sa slike 4, određene u odnosu na propisanu dozvoljenu vrednost za akustičku zonu u kojoj se nalazi ugroženi objekat [5]. Rezultat je prikazan na slici 5. Vidi se da postoje okolnosti u kojima izmereni nivo buke premašuje dozvoljenu vrednost i preko 30 dB, što se može tumačiti kao ekstremna pojava. Istovremeno postoje mesta gde je izmereni merodavni nivo buke ispod vrednosti dozvoljene za datu akustičku zonu. U tumačenju ovakvih

rezultata treba uzeti u obzir da muzički zvuk postaje čujan kada su neke njegove spektralne komponente iznad nivoa trenutne ambijentalne buke. Po svojoj prirodi muzički zvuk nosi informacije koje mogu da privuku pažnju, pa svojom prepoznatljivošću izazovu uznemiravanje.

Postoje brojni noćni klubovi koji rade, a to znači i emituju buku do 4 sata ujutru, pa i duže. Na slici 6 prikazana je statistika vremena u kome su vršena merenja buke čiji su rezultati prikazani na prethodnim slikama. Vidi se da je to dominantno između 22 sata uveče i 4 sata ujutru. U tom dnevnom intervalu nivo ambijentalne buke u gradu je na dnevnom minimumu. To su okolnosti u kojima je moguće prepoznati čak i tihi zvuk muzike iz nekog ugostiteljskog objekta iz okruženju. Zbog toga je moguće da muzički zvuk relativno niskog nivoa noću nekome bude neželjen, što je dovoljno da se javi osećaj ugroženosti bukom i kada ona ne prelazi Uredbom propisane vrednosti [5].



Sl. 6. Statistika vremena (doba dana) merenja buke na kontrolnim pozicijama sa kojih je prijavljeno ugrožavanje bukom

Okolnosti ugrožavanja bukom u tihim ambijentima zahtevaju u inženjerskoj praksi specifičan tretman. Uznemiravanje zvukom je kompleksna pojava, pa zakonodavni okvir zaštite od buke ne može da pokrije sve moguće slučajeve. Očigledno je da primetnost zvuka iz ugostiteljskih objekata, a time i uznemiravanje ljudi, nije u direktnoj vezi sa apsolutnim vrednostima u decibelima, već zavisi od konkretnih okolnosti u svakom ambijentu iz koga je prijavljeno uznemiravanje.

V. DISKUSIJA REZULTATA

Rezultati do kojih se došlo u ovoj studiji pokazuju da su neki ugostiteljski objekti veoma bučni prostori koji se prema postojećoj klasifikaciji u velikom broju svrstavaju u kategoriju „vrlo bučnih prostorija“ [4]. Činjenica je da zvučna izolacija zgrada u kojima se oni nalaze nije usklađena sa takvim stanjem. Takva neusklađenost primenjene zvučne

izolacije ugostiteljskih objekata i akustičkog stanja u njima kao posledicu daje pojavu opisanu slikom 1.

Posebno karakterističan slučaj u opštem problemu bučnih ugostiteljskih objekata u Beogradu koji ugrožavaju svoju okolinu javlja se na lokacijama gde postoji njihova koncentracija. Jedan od takvih karakterističnih slučajeva je leva obala Save gde su na brojnim splavovima locirani noćni klubovi. One među njima za koje se najviše vezuju pritužbe građana može okarakterisati nekoliko fenomena. To su:

- veoma visoki nivoi buke unutar objekata (u nekim i preko 100 dBA na mestu gde se nalaze posetioci);
- prostorna koncentracija objekata koja otežava određivanje uticaja svakog pojedinačno;
- pozicija u odnosu na konfiguraciju terena tako da se zvuk koji proizvode čuje i na lokacijama udaljenim više stotina metara.

- žamor i druge zvučne pojave u blizini ugostiteljskih objekata koje neminovno prate njihov rad (upotreba motornih vozila, pomeranje stolica, glasan razgovor i drugo).

Koncentracija bučnih splavova na levoj obali reke Save je dobro poznata pojava u Beogradu, ali su vremenom nastala i druga „žarišta“ na kojima se pojavljuje izvesna koncentracija bučnih ugostiteljskih objekata. Pri tome ona, za razliku od splavova na Savi, nastaju u urbanom jezgru, neka od njih i u rezidencijalnim krajevima grada. Sve to nameće potrebu propisivanja nekih tehničkih uslova za minimum zvučne zaštite koju ugostiteljski objekti moraju da primene kako bi im se odobrio rad, ali i graničenja u procesu njihovog otvaranja.

Dobijeni rezultati su takođe pokazali da među ugostiteljskim objektima postoje značajne razlike u nivoima zvuka izmerenim u njihovoj unutrašnjosti. To ukazuje na potrebu uvođenja izvesne kategorizacije (klasifikacije, karakterizacije) ugostiteljskih objekata sa aspekta buke koja se može očekivati. Iz toga bi kao posledica trebalo da proizađu različiti tehnički zahtevi kojim se propisuju nivoi zvučne zaštite za svaku od prepoznatih kategorija. Na osnovu toga bi se jasnije postavili uslovi koje treba ugostiteljski objekti da zadovolje u pogledu zvučne izolacije i drugih mera zaštite radi minimizacije ugrožavanja životne sredine, i čija bi se ispunjenost proveravala prilikom dobijanja dozvole za rad.

VI. ZAKLJUČAK

Uznemiravanje bukom iz ugostiteljskih objekata u Beogradu deo je svakodnevice mnogih građana, pa je često prisutna tema u javnim glasilima i u govorima političara. To je bio povod za pokretanje studije čiji su neki rezultati prikazani u ovom radu. Iako postoje dobro poznata „žarišta“ kao što su na primer noćni klubovi na splavovima duž obale Save ili u objektima koncentrisanim u Cetinjskoj ulici, u ovom radu je pokazano da se takav ekološki problem javlja praktično po čitavom gradu. U najvećem broju slučajeva buka potiče od elektroakustičkih uređaja za reprodukciju muzike, a uznemiravanje se po pravilu javlja u noćnim satima. Rezultati prikazani u ovom radu u izvesnoj meri pokazuju kvantitativni aspekt tog problema.

Rešavanje specifičnog problema buke iz ugostiteljskih objekata zahteva kompleksan pristup. Verovatno zbog toga nije do sada učinjen značajniji pomak u njegovom rešavanju jer nikada do sada nije sagledana ta kompleksnost. Sve se svodilo na delovanje ekološke inspekcije koja povremeno deluje po pritužbama građana.

Adekvatan pristup u traženju rešenja zahteva delovanje ne samo na regulativi iz domena zaštite od buke, već istovremeno u mnogo širem obimu. Neke promene su neophodne u domenu građevine (tehnički uslovi za projektovanje i izgradnju objekata), urbanizma (urbanistički uslovi za moguće lokacije najbučnijih ugostiteljskih objekata), zaštite na radu zaposlenih u njima (regulativa postoji, samo treba da se ustanovi njena primena u takvim specifičnim objektima) i ugostiteljstva (uslovi za radne dozvole, radno vreme i slično)

Uz sve to, mora se konstatovati da deo problema kojim se bavi ova studija tangira i domen sociologije, odnosno psihologije, jer je u korenu svega današnje shvatanje estetike muzike koje nameće želju gostiju za visokim nivoom zvuka da bi se postogao očekivani ugođaj. Iako taj netehnički aspekt problema izlazi iz okvira tehničkog razmatranja primenjenog u studiji, u tesnoj je vezi sa njim. Rad na studiji se nastavlja, pa će u daljem radu i taj aspekt biti razmotren.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je proizašao iz aktivnosti koje su realizovane na osnovu ugovora sa Sekretarijatom za zaštitu životne sredine, Gradske uprave grada Beograda. Studiju zajednički realizuju istraživači Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Laboratorije za akustiku i vibracije Instituta za ispitivanje materijala i Sabračajnog instituta CIP.

LITERATURA

- [1] *Guidelines for community noise*. Geneva, World Health Organization, 1999.
- [2] SRPS ISO 1996-1:2010, Akustika – Opisivanje, merenje i ocenjivanje buke u životnoj sredini – Deo 2: Određivanje nivoa zvučnog pritiska
- [3] SRPS ISO 1996-2:2010, Akustika – Opisivanje, merenje i ocenjivanje buke u životnoj sredini – Deo 1: Osnovne veličine i procedure ocenjivanja
- [4] SRPS U.J6.201:1990, Akustika u građevinarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada
- [5] Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini, Sl. glasnik RS br. 75/2010

ABSTRACT

Extensive annoyance by noise generated in night clubs and restaurants is a well-known environmental problem in Belgrade. The noise comes mostly from mighty electroacoustic systems. However, the problem is more complex because the fact that such places imply gathering a larger number of people, dominantly during night, brings pollution due to various sound phenomena that accompany such events (shouting, cars etc.). This paper presents some results of a study organised to analyse the problem and suggest procedures that can somehow reduce it. The paper presents the spatial distribution of the places that have been the subject of citizens' complaints to the ecological inspection during past four years and the analysis of the

results obtained by noise control measurements performed in the same period.

**Study of the annoyance caused by noise from night clubs
and restaurants in Belgrade**

Miomir Mijić, Aleksandar Milenković, Danica Boljević,
Damir Savković, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković, Dragana
Šumarac Pavlović

Određivanje ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada na bazi izdvojenih karakterističnih događaja

Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Tatjana Miljković

Apstrakt—Primenom mikrofonskog niza i algoritama za prostorno-vremensku obradu signala moguće je eksperimentalno utvrditi funkciju gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije u urbanim uslovima. Takav postupak je vremenski zahtevan jer je potrebno analizirati dugačke vremenske segmente saobraćajne buke snimljene mikrofonskim nizom. U ovom radu prikazana je metodologija za eksperimentalno određivanje ugaone raspodele na osnovu kratkih segmenata karakterističnih tipova zvučnih izvora u urbanim uslovima. Dobijene rezultate je potrebno težinovati jer njihov doprinos nije isti. U radu je prikazan postupak za određivanje optimalnih vrednosti težinskih koeficijenata za karakteristične događaje. Izvršeno je poređenje ostvarenih vrednosti izolacione moći izračunatih za pojedinačne događaje koristeći optimalne vrednosti težinskih koeficijenata sa vrednostima izolacione moći izračunate na osnovu dugačkih segmenata saobraćajne buke. Pokazano je da se vrednost ostvarene izolacione moći mogu proračunati na osnovu kratkih vremenskih segmenata i odgovarajućih težinskih koeficijenata. Na taj način postupak izračunavanja ugaone raspodele, a samim tim i ostavene vrednosti izolacione moći fasadne pregrade je ubrzan nekoliko desetina puta.

Ključne reči— korekcionni faktori, lokalizacija, mikrofonski niz, proračun zvučne izolacije, saobraćajna buka, ugaona raspodela, urbani uslovi.

I. UVOD

Pokazano je da vrednost izolacione moći pregrade R , zavisi od ugaone raspodele incidentne energije [1-2]. Raspodela incidentne energije spoljašnje buke u opštem slučaju nije poznata. Korišćenjem standardizovanih tehnika merenja pomoću zvučnika i pomoću saobraćaja pokazano je da vrednosti $D_{2m,nT}$ mogu varirati i do 8 dB [3]. Ove varijacije potiču od razlike između incidentnih uglova realne saobraćajne buke i incidentnog ugla koji se koristi u merenjima sa zvučnikom [4]. Na osnovu toga zaključuje se da ugaona raspodela incidentne energije zavisi od konfiguracije terena u kom se analizirana zgrada nalazi.

Upotrebom optimizovanog neregularnog mikrofonskog niza i algoritama za prostorno-vremensku obradu signala pokazano je da je moguće odrediti nepoznate ugaone

raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi zgrada u urbanim uslovima [5-7]. Eksperimentalno određene ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke i poznate vrednosti građevinskih parametara korišćene su za predikciju izolacione moći fasadnih pregrada [8, 9]. Na osnovu oblika ugaonih raspodela definisane su kategorije konfiguracija terena u urbanim uslovima.

Da bi se predloženom metodom odredila ugaona raspodela potrebno je izvršiti snimanje buke mikrofonskim nizom u dužem intervalu vremena. Vremenska i računaska kompleksnost ovog postupka direktno je srazmerna trajanju snimljenog signala. U prethodnim istraživanjima [10] analiziran je uticaj pojedinačnih izvora buke na ostvarene vrednosti izolacione moći pregrade. Motivacija za to istraživanje je bila potreba da se smanji vremenska kompleksnost postupka. Pokazano je da se ostvarene vrednosti izolacione za pojedinačne događaje dramatično razlikuju, što je posledica različitih oblika funkcije gustine verovatnoće incidentne energije. Zaključeno je da pojedinačni događaji treba da budu težinovani određenim koeficijentima, kako bi se njihovom kombinacijom dobio oblik raspodele koji se poklapa sa oblikom raspodele dobijenim na osnovu dužeg vremenskog intervala.

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja [10] i u njemu je ideja da se pronađu koeficijenti kojima bi se težinivali pojedinačni zvučni događaji i na taj način dobio približan oblik raspodele kao za dugačak segment signala. Koeficijenti će biti dobijeni optimizacionim postupkom u kom se minimizuje razlika između „zvučne mape“ kombinacije pojedinačnih događaja, sa težinskim koeficijentima, i „zvučne mape“ dugačkog vremenskog segmenta. Postupak određivanja „zvučnih“ mapa je relativno brz postupak jer se radi o kratkim segmentima signala, pa bi se poznavajući težinske koeficijente značajno ubrzao postupak izračunavanja. U radu su prikazane proračunate vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada na bazi raspodela dobijenih postupkom sa težinskim koeficijentima za dve najčešće korišćene pregrade u urbanim uslovima.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazani su mikrofonski niz, algoritam za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza, postupak za izračunavanje ugaone raspodele, model za proračun izolacione moći pregrade i optimizacioni postupak za dobijanje težinskih koeficijenata za tipove saobraćajne buke. U trećem poglavlju prikazan je postupak za određivanje težinskih koeficijenata za pojedinačne tipove saobraćajne buke. U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati i njihova diskusija. U poslednjem poglavlju izneti su zaključci.

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Miodrag Stanojević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: miodragstanojevic@bitprojekt.co.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).

II. METODE

A. Mikrofonski niz i algoritam za prostorno-vremensku obradu signala

Planarni mikrofonski niz sa 24 mikrofona se u ovom radu koristi kao merni alat za određivanje lokacije i energije izvora u prostoru u odnosu na fasadnu pregradu. Na osnovu referentnog spektra buke u urbanim uslovima [11] i spektra dobijenog merenjem u urbanim uslovima [12] određen je frekvencijski opseg od interesa za analizu. Postupak optimizacije i konstrukcije mikrofonskog niza dat je u [7, 13-14].

Bazični algoritmi za obradu signala, kao što su *Delay and sum* algoritam (*DaS*) [15] i konvencionalni *beamforming* algoritam (CB) [16], nisu pogodni za korišćenje u ovoj aplikaciji zbog male dinamike koja se pomoću njih može ostvariti. U ovom radu za lokalizaciju izvora u prostoru korišćen je algoritam DAMAS2 [17]. Ovaj algoritam koristi rezultat dobijen pomoću CB algoritma, a zatim dekonvolucionim postupkom eliminiše uticaj mikrofonskog niza iz rezultata. Na taj način ostvaruje se veća dinamika, odnosno mogu se lokalizovati izvori koji su značajno tiši od dominantnih zvučnih izvora [18]. Kao rezultat algoritma dobija se „zvučna mapa“ na kojoj je vrednost zvučne energije predstavljena bojama. Rezultati se izračunavaju za 1/3 oktavne frekvencijske opsege.

Izračunavanje funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije na fasadi vrši se na osnovu rezultata algoritma za prostorno-vremensku obradu signala. Postupak za svođenje prostorne raspodele energije, izračunate pomoću algoritama i mikrofonskog niza, na ugaonu raspodelu u odnosu na normalu opisan je u [5-7].

B. Proračun izolacione moći fasadne pregrade

Izolaciona moć monolitne fasadne pregrade može se izračunati na osnovu sledeće jednačine [19]:

$$R = -10 \log(\tau), \quad (1)$$

gde τ predstavlja koeficijent transmisije analizirane pregrade [19]. Poznavanjem građevinskih karakteristika pregrade i izračunatih frekvencijski zavisnih funkcija gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije moguće je izračunati vrednosti izolacione moći.

III. ODREĐIVANJE TEŽINSKIH KOEFICIJENATA ZA POJEDINAČNE TIPOVE SAOBRAĆAJNE BUKE

U ovom poglavlju biće prikazan postupak određivanja težinskih koeficijenata koji se koriste za dobijanje „zvučne mape“ linarnom kombinacijom različitih tipova izvora. Na mernoj lokaciji koja je analizirana u ovom radu izdvajaju se tri tipa pojedinačnih događaja: prolazak automobila (Automobili), prolazak trolejbusa (Trole) i ambijentalna buka (Ambijent), koja nastaje od udaljenih zvučnih izvora. Učestanost ovih događaja je različita, pa je i njihov doprinos u ukupnoj raspodeli incidentne energije na fasadi različit. Zbog toga je potrebno pronaći koeficijente pomoću kojih bi se težinavao doprinos pojedinačnih izvora. Ukupna „zvučna mapa“ dobija se na sledeći način:

$$A_{ukupno} = w_1 \cdot A_{Automobili} + w_2 \cdot A_{Trole} + w_3 \cdot A_{Ambijent}, \quad (2)$$

gde A predstavlja rezultat DAMAS2 algoritma za pojedinačne događaje i ima dimenzije 180x80, a w predstavljaju težinske koeficijente koje je potrebno odrediti.

„Zvučna mapa“ koja se može smatrati relevantnom za ovu mernu lokaciju je poznata ($A_{30minuta}$) i napravljena je na osnovu snimka saobraćajne buke od 30 minuta [7]. Težinski koeficijenti mogu se odrediti optimizacionim postupkom u kome je kriterijumska funkcija apsolutna razlika „zvučnih mapa“ dobijenih na osnovu snimka od 30 minuta i „zvučne mape“ definisane izrazom (2). Optimizacioni problem se može zapisati na sledeći način:

$$\min_{w_1, w_2, w_3} \left(\sum |A_{30minuta} - A_{ukupno}| \right), \quad (3)$$

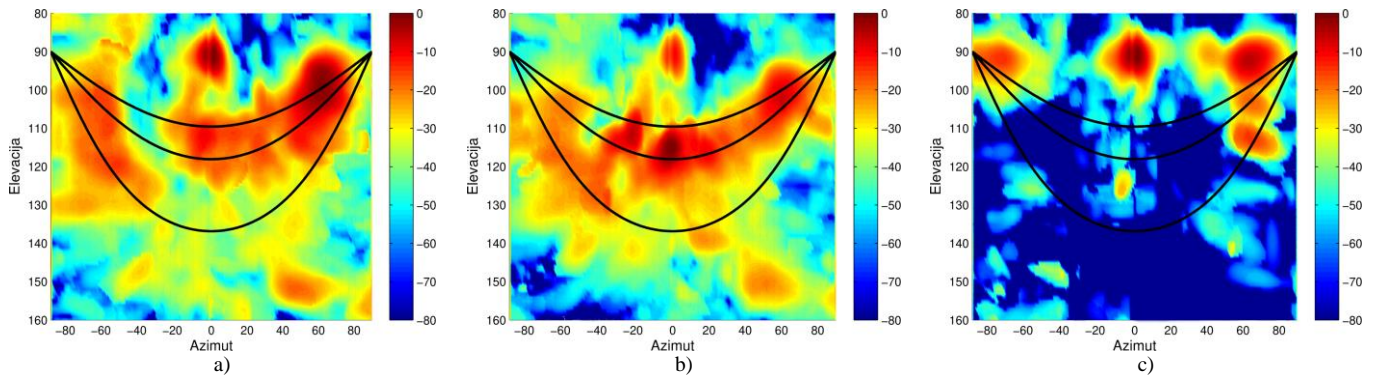
gde težinski koeficijenti uzimaju vrednosti iz opsega [0,1]. Problem pronalaska minimuma moguće je rešavati na više načina. U ovom radu obabran je nelinearan metod pronalaska minimuma funkcije sa ograničenjima [20]. Pošto su „zvučne mape“ frekvencijski zavisne potrebno je za svaki 1/3 frekvencijski opseg rešavati problem definisan izrazom (3). Postoji ukupno 10 takvih opsega i za svaki od njih je potrebno odrediti optimalne vrednosti koeficijenata.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazani su izgledi „zvučnih mapa“ i eksperimentalno određenih funkcija gustina verovatnoća ugaonih raspodela incidentne energije spoljašnje buke na fasadi zgrada za pojedinačne tipove izvora. Oblici raspodela izračunati su za 1/3 oktavne frekvencijske opsege, ali su zbog ograničenog obima rada prikazani samo neki frekvencijski opsezi. Zaključci koji su izvedeni za prikazane oblike važe i u ostalim opsezima. Pored toga, prikazana je ukupna „zvučna mapa“ dobijena na osnovu optimalnih vrednosti težinskih koeficijenata za pojedinačne izvore buke i odgovarajuće raspodele energije.

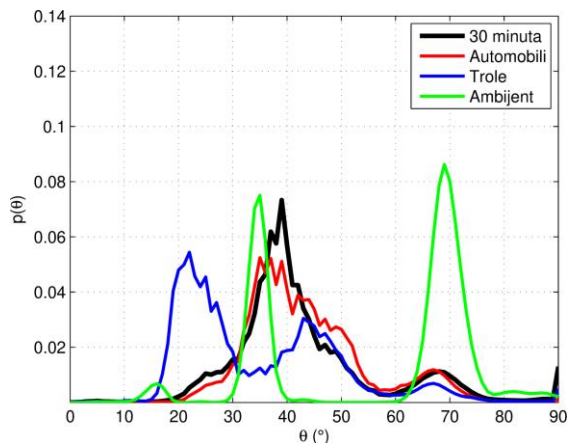
Analizirano je 6 prolazaka automobila, 4 prolaska trolejbusa i 4 segmenta ambijentalne buke. Pošto se radi o dvosmernoj ulici vođeno je računa da u snimcima budu zastupljeni prolasci vozila i u jednom i u drugom smeru. Ukupno trajanje snimaka prolaska automobila je 35 sekundi, prolaska trolejbusa 26 sekunde, a ambijentalne buke 20 sekundi. „Zvučne mape“ izračunate su pomoću DAMAS2 algoritma za svaki od pojedinačnih događaja, a zatim usrednjene kako bi se za svaku kategoriju izvora dobila rezultujuća „zvučna mapa“.

Na Slici 1 prikazani su izgledi „zvučnih mapa“ za jedan frekvencijski opseg i tri tipa usvojenih izvora buke za analiziranu mernu lokaciju. Prikazi su normalizovani na maksimalnu vrednost pojedinačnih mapa, ali su relativni odnosi rezultata očuvani za dalje proračune funkcija gustina verovatnoće i ostvarene vrednosti izolacione moći. Sa Slike 1 se može uočiti da postoje velike razlike u distribuciji zvučne energije po prostoru za različite zvučne izvore. U slučaju prolaska automobila i trolejbusa najveći deo energije dolazi iz prostornih uglova koji odgovaraju saobraćajnim trakama. U slučaju ambijentalne buke najveći deo energije dolazi iz prostornih uglova koji odgovaraju krajevima ulice i uglovima upravnim na fasadu zgrade. Ambijentalna buka koja prelazi veliki put detektuje se na prostornim uglovima koji su upravni na ravan fasade.



Sl. 1. Rezultati DAMAS 2 algoritma za 1/3 oktavne frekvencijske opseg 800Hz i izdvojene događaje: a) automobili, b) trolejbusi, c) ambijent,

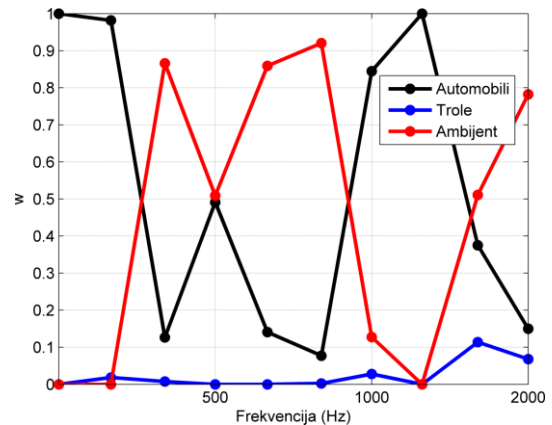
Poredeći „zvučne mape“ dobijene za pojedinačne zvučne izvore i „zvučnu mapu“ dobijenu za vremenski segment od 30 minuta, prikazan na Slici 4 a), zaključuje se da je „zvučna mapa“ za segment od 30 minuta nastala kao kombinacija uticaja pojedinačnih događaja. Neki od događaja više „liče“ na „zvučnu mapu“ dugačkog vremenskog segmenta, ali se ne može direktno utvrditi udeo pojedinačnih izvora u ukupnoj slici. Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da će se funkcije gustine verovatnoće razlikovati za pojedine tipove izvora i pojedinačno i od oblika raspodele za vremenski segment od 30 minuta. Oblici funkcija gustine verovatnoće za pojedinačne tipove izvora i segment od 30 minuta prikazane su na Slici 2.



Sl. 2. Funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke za 1/3 oktavni opseg 800 Hz za pojedinačne tipove izvora

Dva lokalna maksimuma funkcije gustine verovatnoće za ambijentalnu buku ne odgovaraju lokalnim maksimumima ostalih tipova izvora. Automobili imaju najbliži oblik raspodele ukupnoj raspodeli, koja se smatra tačnom. U funkciji gustine verovatnoće ugaone raspodele izračunate za trolejbusove postoje dva maksimuma, jedan koji odgovara saobraćajnim trakama i drugi koji odgovara kontaktnoj mreži za napajanje.

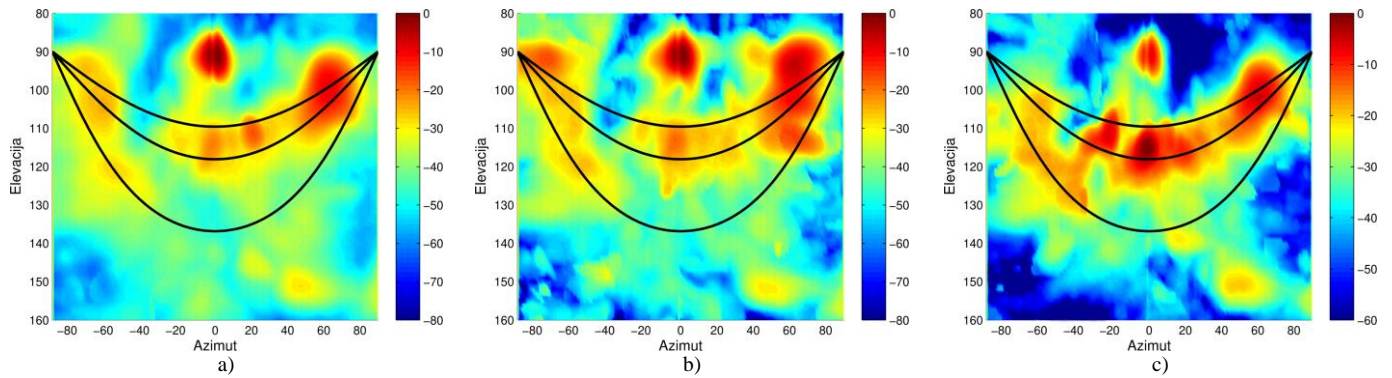
Pošto nijedan od pojedinačnih izvora nema oblik raspodele koji je sličan obliku raspodele dobijene na osnovu dugačkog vremenskog segmenta na osnovu njih nije moguće dobiti vrednost izolacione moći fasadne pregrade sa dovoljnom tačnošću. Na osnovu Slika 1 i 2 ne mogu se uočiti direktne veze tačne mape i pojedinačnih mapa. Zbog toga je potrebno rešiti problem definisan izrazom (3) za „zvučne mape“ pojedinačnih izvora za ovu mernu lokaciju i na taj način dobiti ukupnu mapu na osnovu pojedinačnih događaja, definisanu izrazom (2).



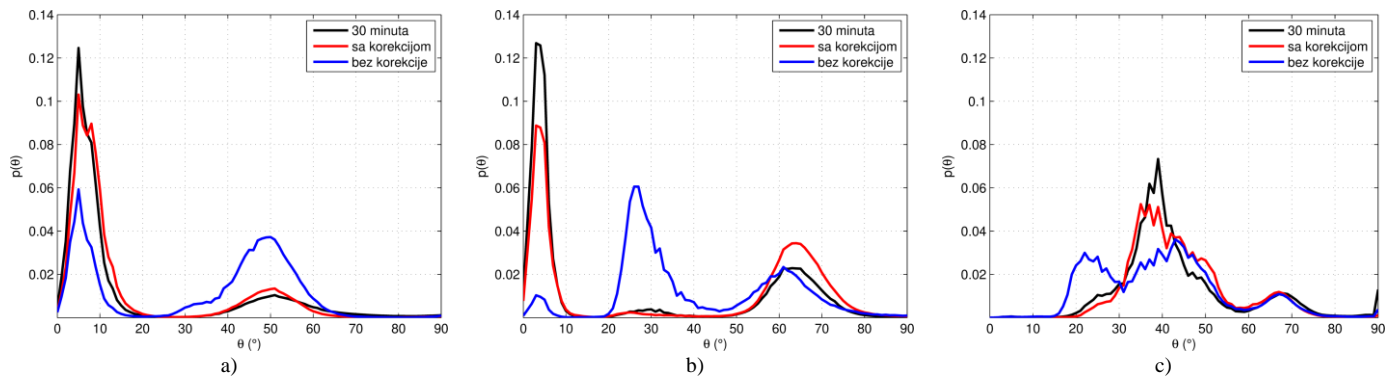
Sl. 3. Vrednosti težinskih koeficijenata za različite tipove izvora i sve frekvencijske opsege od interesa

Na Slici 3 prikazane su vrednosti koeficijenata za sve frekvencijske opsege izračunate optimizacionim postupkom. Vreme izvršavanja optimizacionog postupka za jedan frekvencijski opseg je oko 2 sekunde. Koeficijenti su normalizovani tako da u zbiru daju vrednost 1. Najmanje vrednosti koeficijenata za sve frekvencijske opsege ima tip izvora Trole. Takav rezultat je logičan jer je broj prolazaka trolejbusa u odnosu na broj prolazaka automobila značajno manji. Vrednosti koeficijenata za događaje Automobili i Ambijent su velike, što je pokazatelj velikog prisustva ovih događaja u „zvučnoj mapi“ izračunatoj za vremenski segment od 30 minuta. Za određene frekvencijske opsege koeficijent koji odgovara prolasku automobila ima vrednost blisku 1, što znači da samo ti događaji učestvuju u ukupnom rezultatu. Treba napomenuti da ambijentalna buka postoji i u ostalim tipovima izvora. Pošto je ona značajno manjeg nivoa od ostala dva tipa izvora potrebno je da algoritam za prostorno-vremensku obradu signala ima mogućnost velike dinamike. Pošto je DAMAS2 takav algoritam uticaj ambijentalne buke uračunat je i u ostalim tipovima događaja. U ovom radu uvedena je pretpostavka da je taj uticaj zanemarljiv i to može biti predmet daljih istraživanja.

Na Slici 4 prikazane su „zvučne mape“ vremenskog segmenta od 30 minuta, kombinacije događaja sa izračunatim težinskim koeficijentima (u oznaci sa korekcijom) i kombinacije događaja sa jednakim težinskim koeficijentima (u oznaci bez korekcije). Kombinacija događaja sa jednakim težinskim koeficijentima uvedena je kako bi se sagledao dobitak korišćenja metodologije sa težinskim koeficijentima.



Sl. 4. Zvučne mape za 1/3 oktavnog frekvencijskog opsega 800 Hz: a) snimak od 30 minuta, b) pojedinačne izvore sa korekcijom, c) pojedinačne izvore bez korekcije



Sl. 5. Funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke za snimak od 30 minuta i pojedinačne tipove izvora sa i bez korekcije, za 1/3 oktavnog frekvencijskog opsega: a) 400 Hz, b) 800 Hz, c) 1250 Hz,

Poredeći rezultate sa Slike 4 a) i 4 c) uočavaju se velike razlike u prostornoj distribuciji energije. To je i očekivano jer doprinos svih događaja nije isti. Rezultat prikazan na Slici 4 b) pokazuje da su težinski koeficijenti za ovaj frekvencijski opseg dobro izračunati, jer je dobijena „zvučna mapa“ veoma slična ukuonoj „zvučnij mapi“. Rezultati se ne poklapaju u potpunosti, ali je potrebno izračunati ugaone raspodele i konačno vrednost izolacione moći kako bi se utvrdilo da li je sličnost dovoljna. Za ostale frekvencijske opsege koji nisu prikazani zaključci su slični.

Na Slici 5 prikazane su izračunate funkcije gustine verovatnoće ugaonih raspodela incidentne energije spoljašnje buke na fasadi zgrade za tri frekvencijska opsega. Funkcija gustine verovatnoće bez korekcije predstavlja slučaj kada su svi težinski koeficijenti isti pa se zbog toga oblik raspodele značajno razlikuje od raspodele dobijene za 30 minuta snimka, sa sve frekvencijske opsege. Razlike se pre svega uočavaju u vrednostima lokalnih maksimuma u funkciji gustine verovatnoće ali i u njihovom položaju. Crvenom bojom je predstavljena funkcija gustine verovatnoće u slučaju kada se koriste optimalne vrednosti težinskih koeficijenata, izračunate optimizacionim postupkom. Na Slici 5 a) uočava se dobro poklapanje oblika raspodele dobijene pomoću težinskih koeficijenata i raspodele dobijene na osnovu 30 minuta snimka. Na Slici 5 b) poklapanje ove dve raspodele nije toliko dobro kao na Slici 5 a). Razlike se javljaju u vrednostima lokalnih maksimuma funkcije. Sa Slike 5 c) se uočavaju razlike između crne i crvene krive u oblasti uglova od 30 do 50 stepeni, ali je ta razlika daleko manja u odnosu na razliku između raspodele sa jednakim težinskim koeficijentima i raspodele dobijene na osnovu snimka od 30 minuta.

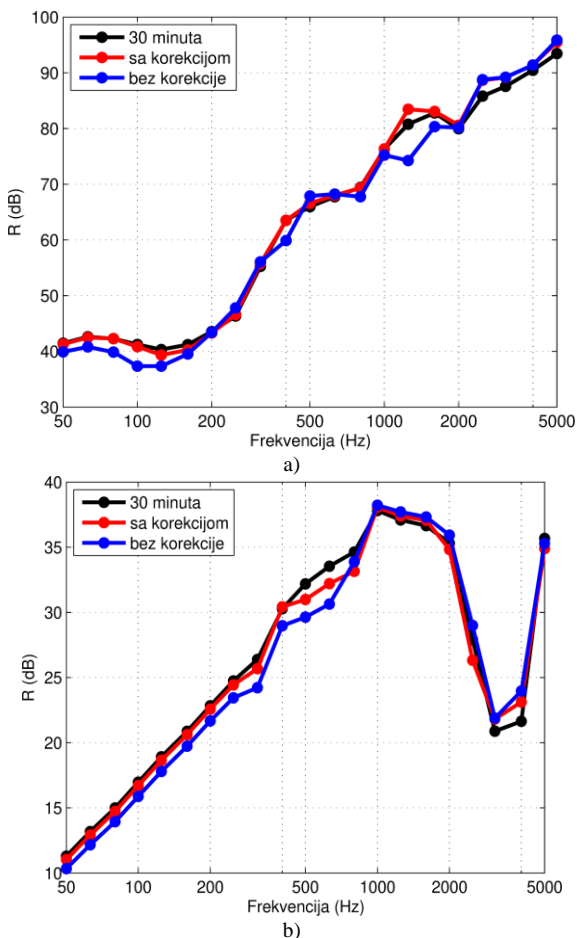
Kako bi se sagledala mogućnost korišćenja metodologije

sa pojedinačnim izvorima i težinskim koeficijentima potrebno je izračunati vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada i uporediti ih sa vrednostima izolacione moći izračunatih na osnovu dugačkog vremenskog segmenta saobraćajne buke na mernoj lokaciji. U tu svrhu izračunate su vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada izrađenih od najčešće korišćenih materijala u urbanim uslovima, betona i stakla. Građevinski podaci ovih pregrada, potrebni za proračun izolacione moći, preuzeti su iz [21].

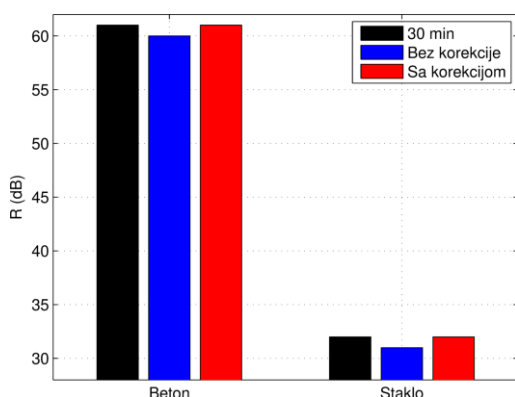
Na Slici 6 prikazane su frekvencijske zavisne ostvarene vrednosti izolacione moći betonske pregrade debljine 20 cm i staklene pregrade debljine 5 mm, za tri slučaja analizirana u ovom radu. Crnom bojom je označena izolaciona moć dobijena na osnovu obrade signala dužine 30 minuta, i ona se smatra referentnom. Plavom bojom je označena kriva izolacione moći koja je dobijena na osnovu pojedinačnih tipova izvora i sa jednakim težinskim koeficijentima. Na osnovu Slike 6 a) uočava se da postoje razlike između ove dve krive u gotovo celom opsegu. Na pojedinim frekvencijama razlike iznose 5 dB. Velike razlike se javljaju na niskim frekvencijama i iznose oko 3 dB. Crvenom bojom označena je izolaciona moć izračunata na osnovu pojedinačnih tipova buke i optimalnih vrednosti težinskih koeficijenata. Sa Slike 6 a) uočava se da ova kriva gotovo ne odstupa od referentne krive (kriva označena crnom bojom), Razlike u celom opsegu od interesa su manje od 1 dB. Na osnovu toga zaključuje se da predloženi postupak sa težinskim koeficijentima pojedinačnih događaja daje zadovoljavajuću tačnost proračuna ostvarene vrednosti izolacione moći u urbanim uslovima.

Na osnovu rezultata za staklenu pregradu, prikazanih na Slici 6 b), mogu se doneti slični zaključci. Razlike između krive sa jednakim težinskim koeficijentima i referentne

krive iznose i do 4 dB. Ova vrednost predstavlja veću relativnu razliku u odnosu na betonsku pregradu, jer je ostvarena vrednost izolacione moći stakledne pregrade značajno manja. Kriva označena crvenom bojom i u ovom slučaju dobro „prati“ referentnu krivu, s tim što postoje izvesne razlike u opsegu od 400 Hz do 1000 Hz.



Sl. 6. Frekvencijska zavisnost proračunate izolacione moći za analizirane slučajeve i a) betonsku pregradu, b) staklenu pregradu



Sl. 7. Jednbrojne vrednosti proračunate izolacione moći za analizirane slučajeve za betonsku pregradu i staklenu pregradu

U svakodnevnoj praksi primene izolacionih materijala uobičajno je korišćenje merodavne vrednosti izolacione moći odnosno jednbrojne vrednosti. Zbog toga su na osnovu vrednosti izolacione moći prikazane na Slici 6 izračunate merodavne vrednosti izolacione moći. Izračunate jednbrojne vrednosti prikazane su na Slici 7. Jednbrojna vrednost izolacione moći izračunate na osnovu dugačkog vremenskog segmenta saobraćajne buke iznosi 62 dB za

betonsku, odnosno 31 dB za staklenu pregradu. Merodavna vrednost izolacione moći za jednake težinske koeficijente iznosi 61 dB za betonsku i 30 dB za staklenu pregradu. U slučaju korišćenja optimalnih vrednosti težinskih koeficijenata za pojedinačne tipove izvora dobijaju se jednbrojne vrednosti izolacione moći iste kao u slučaju korišćenja dugačkog vremenskog segmenta. Na taj način je takođe pokazano da se ovakav pojednostavljen postupak može koristiti, a da se očuva tačnost proračuna.

Za izračunavanje izolacione moći fasadne pregrade na osnovu postupka prikazanog u [7-9] za snimak sa 24 kanala trajanja 30 minuta potrebno je oko 100 sati. Korišćenjem prikazanog postupka, sa analizom pojedinačnih tipova izvora ukupnog trajanja oko 60 sekundi, postupak se ubrzava oko 30 puta, uz zadržavanje tačnosti proračuna.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je upotreba metodologije za određivanje ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke za karakteristične tipove izvora u cilju određivanja vrednosti ostvarene izolacione moći fasadne pregrade. Snimanje i obrada rezultata algoritmima za prostorno-vremensku obradu signala, za dugačke segmente signala, je vremenski i računski kompleksna. Ukoliko bi se definisali ključni događaji na posmatranoj mernoj lokaciji bilo bi dovoljno snimiti samo njih, što bi smanjilo vreme merenja, a samim tim i vreme potrebno za obradu signala. Na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu zaključuje se da svi tipovi događaja nemaju isti uticaj na ostvarenu vrednost izolacione moći. To znači da se prostim sabiranjem uticaja malog broja pojedinačnih događaja neće dobiti rezultat kao kada se merenje izvrši u dužem vremenskom intervalu, npr. 30 minuta. Zbog toga su uvedeni korekcionni faktori koji uvažavaju uticaj pojedinih tipova događaja na generalnu sliku o stanju izolacione moći na analiziranoj lokaciji. U ovom radu prikazan je postupak za određivanje optimalnih vrednosti težinskih koeficijenata. Rezultati algoritma za prostorno-vremensku obradu signala pojedinačnih tipova izvora, kratkog trajanja, uz odgovarajuće težinske koeficijente mogu biti poredivi sa rezultatima dobijenim na osnovu dugačkih vremenskih segmenata signala. Pokazano je da se vrednost ostvarene izolacione moći može proračunati na osnovu kratkih vremenskih segmenata koji predstavljaju karakteristične događaje i težinskih koeficijenata. Merodavne vrednosti izolacione moći dobijene ovim postupkom iste su kao vrednosti dobijene analizom dugačkih segmenata. Vremenska kompleksnost je smanjena za oko 30 puta. Pošto je u urbanim uslovima uvedena kategorizacija ulica na osnovu oblika raspodele incidentne energije na fasadi u daljim istraživanjima cilj će biti da se vrednosti dobijenih težinskih koeficijenata primene za sva merna mesta koja pripadaju ovoj kategoriji. Na taj način bi si ovaj postupak mogao generalizovati i izračunavanjem koeficijenata za jedno merno mesto bi se mogli dobiti koeficijenti za čitavu kategoriju ulica.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] C.Brutel-Vuillet, C.Guigou-Carter, M.Villot, „A Study of the Influence of Incidence Angle on Sound Reduction Index Using NAH-Phonoscopy. Acta Acustica United with Acustica, 2007;Vol. 93: 364–374.
- [2] D. Šumarac Pavlović, F. Pantelić, S. Bojičić, M. Bjelić, „Airborne sound insulation of monolithic partition as a function of incidence angles“, Proc. Forum Acusticum, Krakow 2014.
- [3] G.Vermeir, G.Geentjens, W.Bruyninckx, „Measurement and calculation experiences on façade sound insulation“, Proc INTER-NOISE 2004.
- [4] ISO 140-5 „Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades“.
- [5] M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Measurements of noise energy angular distribution at the building envelope using microphone arrays, Applied Acoustics, Vol 140, 283-287 (2018).
- [6] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Određivanje uglova incidencije buke u urbanim sredinama“, ETRAN, Kladovo, jun 2017, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.1, ISBN: 978-86-7466-692-0.
- [7] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza“, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Doktorska disertacija, jun 2018.
- [8] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke u urbanim uslovima“, ETRAN, Palić, jun 2018, Zbornik radova 49-54, ISBN: 978-86-7466-752-1.
- [9] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadama zgrada u urbanim uslovima pomoću mikrofonskog niza“, 26th Telecommunications forum TELFOR 2018, Belgrade, November 2018, CD Proceedings paper No. 8.9., ISBN: 978-1-5386-7170-2.
- [10] Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Tatjana Miljković, „Određivanje zavisnosti ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada od tipa izvora u urbanim sredinama“, Zbornik radova 63. Konferencije ETRAN, Srebrno jezero, jun 2019, str. 40-45, ISBN: 978-86-7466-785-9
- [11] ISO 717-1:1996 „Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation“.
- [12] C. Buratti, E. Belloni, E. Moretti, “Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions“, Appl. Acoust. 2014;76:238–248.
- [13] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Dizajn mikrofonskog niza optimizovanog za monitoring saobraćajne buke“, ETRAN, Zlatibor, jun 2016, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.2, ISBN: 978-86-7466-618-0.
- [14] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis“, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 141(5), 3101-3104 (2017).
- [15] U. Michel, “History of acoustic beamforming”, Berlin , 2006. Berlin Beamforming Conference.
- [16] T.F. Brooks, W.M. Humphreys, „A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays“, *Journal of Sound and Vibration* 294.4, 856-879, 2006.
- [17] R.P. Dougherty, „Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming“, *AIAA*, 2961.11, 2005.
- [18] K. Ehrenfried, L. Koop, „A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources“, *AIAA journal*, 45.7:1584-1595, 2007.
- [19] L. Beranek, “Noise Reduction. New York”: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.
- [20] T. F. Coleman, Y. Li. „An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds“ *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, 1996, pp. 418–445.
- [21] H. Kurtović, “Priručnik za proračun zvučne izolacije”. Beograd : Elektrotehnički fakultet, Laboratorija za akustiku, 1994.

ABSTRACT

In the general case, the shape of the angular distribution of the sound energy on a building facade is unknown. By using microphone arrays and algorithms for space-time signal processing it is possible to experimentally determine the probability density function of the angular distribution of incident energy in urban conditions. Based on the determined distributions and the physical properties of the building materials it is possible to calculate the in-situ value of the sound reduction index of a façade element. This procedure is time consuming because of the analysis which processes long segments of traffic noise recorded by the microphone array. This paper presents the method to experimentally determine the angular energy distribution based on short recorded signals of different events and types of sound sources which can occur in urban environments. Obtained results have to be weighted based on their contributions in the overall traffic noise. This paper presents the procedure to determine optimal weighting coefficients for characteristic events. A comparison is made between the values of sound reduction index calculated based on energy distributions obtained from weighted individual events and based on longer recordings of traffic noise. It is shown that the value of the in-situ sound reduction index can be calculated based on short time events and weighting coefficients. In this way, the calculation time to obtain in-situ values based on angular energy distributions is reduced by several orders of magnitude.

Estimation of façade sound reduction index in-situ values based on characteristic noise events

Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Tatjana Miljković

Komparativna analiza izolacionih svojstava građevinskih materijala

Dragana Šumarac Pavlović, Ljiljana Popović, Miloš Bjelić

Apstrakt— Zvučni komfor u zgradama obezbeđuje se postizanjem minimalno zahtevanih vrednosti izolacionih svojstava pregradnih elemenata. Sam izbor materijala i načina gradnje menja se u vremenu i uslovljen je različitim uticajima vezanim za tehnologiju gradnje, ekonomske faktore, kao i novim zahtevima koji se postavljaju u domenu drugih vrsta komfora u zgradama, pre svega toplotnog komfora. Iako su izolaciona svojstva klasičnih građevinskih materijala poznata i definisana fizičkim zakonima prostiranja zvuka, u građevinarstvu se neprekidno dešavaju promene koje iziskuju traženje optimalnih konfiguracija koje će moći da zadovolje različite, često i oprečne zahteve iz domena statike, ekonomske održivosti, estetike, zvučnog i toplotnog komfora. U ovom radu prikazana je detaljnija analiza izolacionih svojstava klasičnih građevinskih materijala, koji su u širokoj upotrebi, u funkciji njihovih osnovnih karakteristika, gustine, brzine longitudinalnih talasa, faktora gubitaka i debljine. Cilj toga je da se u procesu projektovanja jasnije definišu karakteristike materijala koje će zadovoljiti postavljene kriterijume.

Ključne reči — građevinska izolaciona moć, zvučna izolacija, zvučni komfor.

I. UVOD

U poslednjih dvadesetak godina došlo je do izvesnih promena u načinu organizacije kako stambenih, tako i poslovnih prostora, sa drugačijim zahtevima i očekivanjima korisnika. Takođe, došlo je i do značajne promene u tehnologiji gradnje različitih građevinskih objekata koji imaju konsekvence na zvučni komfor u zgradama. Jedna od najznačajnijih promena nastala je uvođenjem pravilnika o energetske efikasnosti zgrada [1]. Ovim pravilnikom uvedeni su novi uslovi koje u pogledu toplotne provodljivosti moraju da zadovolje pregradni elementi između prostora dva korisnika. U praksi se pokazalo da su rešenja kojim se to postiže po svojoj prirodi često suprotna zahtevima koje definišu kriterijumi za potrebnu zvučnu izolaciju. Jedna od posledica je da su tradicionalni materijali velike gustine ustupili mesto lakšim materijalima koji imaju bolja termoizolaciona svojstva, čime je narušen kvalitet zvučne zaštite. Sa druge strane, u proteklom periodu u domenu zvučnog komfora, a to znači zvučne zaštite, nisu

doneti odgovarajući pravilnici koji bi ispratili promene u ostalim domenima vezanim za generalni komfor u građevinskim objektima. U Srbiji je jedini dokument kojim se regulišu pitanja vezana za zvučni komfor u zgradama standard SRPS UJ.6.201 iz 1989 [2]. Ovim pravilnikom definisane su minimalne vrednosti građevinske izolacione moći od vazdušnog zvuka i maksimalni dozvoljeni nivoi zvuka udara za različite tipove zgrada i različite pozicije pregradnih elemenata u njima. U periodu od donošenja ovog pravilnika do danas došlo je do značajnih promena u svim domenima, od načina gradnje zgrada do očekivanja njihovih korisnika.

Neretko se u praksi mogu sresti situacije u kojima građevinske vrednosti izolacione moći zadovoljavaju postavljene minimalne kriterijume iz SRPS UJ.6.201, ali postoji jasno izraženo nezadovoljstvo korisnika zgrade. Ovo se događa prevashodno u objektima luksuzne gradnje. U njima, kao posledica funkcionalne organizacije unutar stambenih jedinica, tihog okruženja i visoko kvalitetnih fasadnih elemenata, nivo ambijentalne buke je toliko nizak, da postavljeni uslovi za zvučnu izolaciju ne zadovoljavaju uslove privatnosti. U zakonodavstvima drugih zemalja ovakvi problemi rešavani su na dva načina. U nekim zemljama uvedena je klasifikacija objekata [3] kojom su definisane minimalne vrednosti potrebne izolacione moći, ali i vrednosti koje treba da budu zadovoljene za više klase objekata. Na taj način je već na nivou definisanja projektnog zadatka na investitora prebačena odgovornost da definiše nivo kvaliteta koji objekat treba da zadovolji. Drugi mogući pristup u rešavanju ovakvih problema definisan je primenom parametra indeks privatnosti [4-6]. Pošto trenutni zakonodavni okvir u Srbiji u domenu zvučnog komfora ne predviđa ni jedan od mogućih pristupa, na investitoru je da definiše nivo zvučnog komfora koji želi.

Drugi aspekt zvučne zaštite u objektima vezan je za promenu načina proračuna laboratorijskih i građevinskih izolacionih svojstava pregrada. U Srbiji su usvojeni standardi iz serije SRPS ISO EN 12354 [7-9]. Ovi standardi definišu proračun građevinske izolacione moći R' za vazdušni zvuk i nivo udarnog zvuka L'_n . Kao ulazni podaci za ove proračune koriste se dimenzije prostorija, laboratorijske vrednosti izolacionih moći svih pregradnih elemenata i vrste njihovih spojeva.

Na tržištu građevinskih materijala postoji veliki broj proizvoda istog generičkog imena, a značajno različitih karakteristika, pre svega gustine, a time i površinske mase. Sam način gradnje i završne obrade unose u praksi značajnu varijabilnost, pre svega u pogledu rezultatne površinske mase pregrade. Ovaj problem naročito je izražen kada su u pitanju opekarski šuplji blokovi čije gustine variraju u

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Ljiljana Popović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: ljilja95popovic@hotmail.com, Stipendista Ministarstva

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

širokom dijapazonu od oko 650 kg/m³ do oko 1200 kg/m³. Ovi elementi su danas u najčešćoj upotrebi jer zadovoljavaju termičke zahteve bez dodatnih izolacionih obloga. S druge strane, zbog malih gustina ovih blokova način njihove završne obrade, to jest debljina sloja maltera, može značajno da promeni ukupna izolaciona svojstva.

U ovom radu je analizirana promena laboratorijskih vrednosti izolacione moći u funkciji promene svih ulaznih fizičkih parametara pregrade sa ciljem da se definišu dimenzije i njihove gustine s kojima se mogu postići minimalni uslovi iz standarda SRPS UJ.6.201. U najvećem broju pozicija u stambenim objektima zahteva se minimalna građevinska izolaciona moć od 52 dB. U praksi se pokazalo da u slučaju luksuznih objekata minimalna vrednost građevinske izolacione moći 52 dB ne zadovoljava zahteve korisnika u pogledu privatnosti. U takvim okolnostima minimalni uslov mora se pomeriti za najmanje 3 dB, to jest na vrednost 55 dB građevinske izolacione moći. Da bi se postigla ovakva vrednost građevinske izolacione moći, laboratorijske vrednosti moraju se uvećati za uticaj bočnog provođenja. U tom domenu postoje praktične preporuke za projektovanje. U njima se aproksimativno navodi za slučaj homogenih masivnih pregrada da je razlika laboratorijske i građevinske vrednosti 5 dB, računajući i izvesnu marginu sigurnosti. Sprovedena analiza referencirana je na usvojene granične vrednosti od 52 dB i 55 dB.

II. PRORAČUN IZOLACIONIH SVOJSTAVA PREGRADA OD RAZLIČITIH MATERIJALA

U standardu SRPS 12354-1, Annex B definisana je metodologija za proračun homogenih masivnih zidova na bazi osnovnih podataka o karakteristikama materijala. Kao ulazni podaci za proračun koriste se:

- površinska masa m_s
- debljina pregrade d
- ukupni unutrašnji gubici η_{tot}
- brzina longitudinalnih talasa c_L .

TABELA I
VREDNOSTI PARAMETARA GRAĐEVINSKIH MATERIJALA DEFINISANIH U ANEKSU B STANDARDA SRPS 12354

materijal	ρ (kg/m ³)	c_L (m/s)	η_{tot}
beton	2300	3500	0,006
silikatni blokovi	1750	2600	0,015
laki beton	1300	1700	0,015
autoklavirani gas beton	650	1400	0,010

U praksi je često javlja situacija da ne postoje laboratorijska merenja za sve proizvode koji su na tržištu, ili u projektu ne sme da bude specificiran tačan proizvođač zbog procedure tendera za izvođenje. Zbog toga se često u fazi projektovanja usvajaju proračunske vrednosti izolacionih moći koje se dobijaju po Aneksu B standarda SRPS EN 12354-1. U njemu su specificirani ulazni podaci potrebni za proračun pregrada od nekoliko klasičnih građevinskih materijala. Njihove vrednosti prikazane su u Tabeli I. Za ostale materijale koji se nalaze na tržištu, a pre svega za šuplje opekarske blokove Aneks B ne daje sve relevantne podatke. U literaturi se mogu pronaći i dodatni

podaci pre svega o zidanim zidovima [10]. Oni su prikazani u Tabeli II.

TABELA II
DODATNI PODACI IZ LITERATURE O VREDNOSTIMA PARAMETARA GRAĐEVINSKIH MATERIJALA

materijal	m_s (kg/m ³)	c_L (m/s)	η_{tot}
siporeks	600-1000	1700	0,01
laki beton	1300-1600	1700	0,015
opeka i silikatni blokovi	1800-2000	2400	0,015
teski beton	2000-2400	3500	0,006

U ovoj analizi sproveden je proračun izolacionih svojstava pregradnih zidova za vazdušni zvuk koji je baziran na četiri osnovna tipa građevinskih materijala navedenih u Tabeli II. Svi posmatrani materijali mogu imati gustine koje variraju u određenom rasponu navedenom u tabeli. Faktor unutrašnjih gubitaka je parametar koji nije uvek dostupan u tehničkom opisu materijala i on se usvaja na bazi opštih načela. Faktor koji pored gustine ima dominantan uticaj na konačne vrednosti izolacionih svojstava je brzina longitudinalnih talasa.

Brzina longitudinalnih talasa u pločama zavisi od Jungovog modula elastičnosti i gustine materijala [11]:

$$c_{L, ploče} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m(1-\mu^2)}} \quad (1)$$

gde je μ Poasonov broj koji se za posmatrane materijale kreće između 0,1 i 0,2. Formula (1) važi za homogene strukture kao što su betonski zidovi. Zidovi formirani od manjih elemenata kao što je opeka i blokovi povezani malterom predstavljaju nehomogeni građevinski materijal čija mehanička svojstva zavise od mehaničkih svojstava svih komponenata i njihovih međusobnih fizičkih interakcija, njihovog zapreminskog odnosa u celini zida, svojstava njihovih međusobnih veza i postojanja eventualnih pukotina i rupa u formiranom zidu. U svemu tome i karakteristike maltera mogu da variraju značajno i tako menjaju dinamičke karakteristike zida u celini. Teorijski postupci proračuna osnovnih parametara materijala počivaju na pretpostavci da se radi o izotropnom materijalu, jer se onda primenjuje najjednostavnija teorija elastičnosti. Sa smanjivanjem gustine materijala, menja se i Jungov moduo elastičnosti tako da porozniji materijali i pored manje gustine imaju niže vrednosti brzine longitudinalnih talasa [12].

U projektantskoj praksi česte su situacije u kojima nisu dostupni atesti sa laboratorijskim merenjima pregrada koji se zahtevaju za primenu algoritama koji se navode u standardima iz serije SRPS EN 12354. Takođe se u projektima javljaju iste osnovne pregrade sa drugačijim završnim slojem, na primer sa različitom debljinom sloja maltera, što je praktično nemoguće sve potkrepiti atestima. Jedina metodologija koja je primenjiva u takvim okolnostima je proračun laboratorijske vrednosti izolacione moći na bazi algoritma iz Aneksa B standarda SRPS EN 12354-1.

Da bi se sagledao opseg varijabilnosti laboratorijskih vrednosti izolacione moći pregrada u funkciji promene svih ulaznih fizičkih parametara, izvršeni su proračuni prema algoritmu iz Aneksa B. Na slikama 1 i 2 prikazane su na dva

načina proračunske laboratorijske vrednosti izolacionih moći za nekoliko varijanti materijala iz Tabele II.

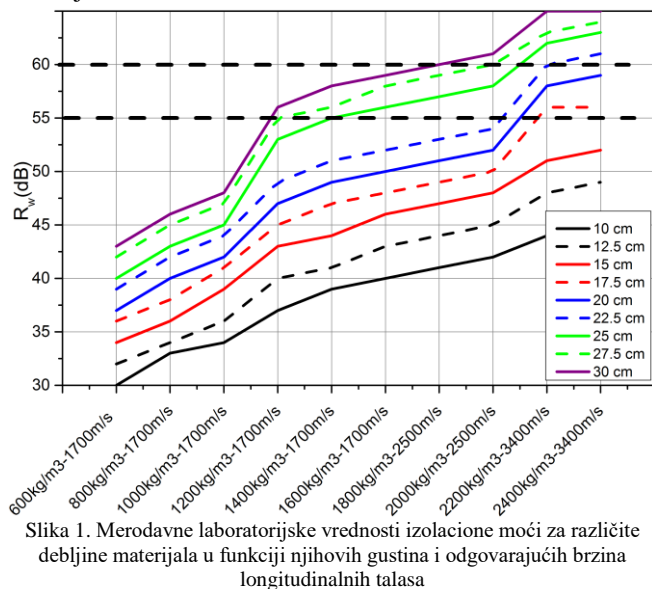
Analizirani su različiti materijali koje karakteriše pre svega njihova površinska masa. Za određene vrednosti površinske mase i odgovarajuće brzine longitudinalnih talasa (gustina i brzina longitudinalnih talasa su povezane fizičke veličine) izračunate su merodavne laboratorijske vrednosti za pregrade različitih debljina u rasponu od 10 cm do 30 cm. Sve izračunate vrednosti upoređene su sa unapred zadatim kriterijumom da pregrada postigne građevinsku izolacionu moć od 52 dB, odnosno 55 dB (računajući da u tom slučaju laboratorijske vrednosti moraju da budu najmanje 57dB, odnosno 60dB respektivno). Horizontalnim linijama označene su zahtevane vrednosti građevinske izolacione moći od 52 dB i 55 dB, što znači da su odgovarajuće potrebne laboratorijske vrednosti $R_w = 55$ dB (za $R'_w = 52$ dB) i $R_w = 60$ dB (za $R'_w = 55$ dB).

Proračunate vrednosti prikazane su na dva načina. Na slici 1 možemo da uočimo trend promena izolacione moći u funkciji gustine materijala (i njoj odgovarajuće brzine longitudinalnih talasa) za odabranu debljinu pregrade. Ovakav prikaz nam omogućava da u fazi projektovanja za zadatu debljinu zida možemo i moramo da definišemo osim vrste materijala i njegove karakteristike kako bismo bili sigurni da će u izvedenom stanju pregrada da zadovolji postavljene minimalne zahteve.

Merodavne građevinske izolacione moći veće od 52 dB moguće je ostvariti sa materijalima koji imaju površinsku masu veću od 1200 kg/m³ u debljinama preko 25cm i sa materijalima čija je površinska masa veća od 2000 kg/m³ (beton) i u debljinama preko 20 cm. Svi zidovi izgrađeni od različitih blokova čije su površinske mase manje od 1000kg/m³ ne mogu da zadovolje minimalne zahteve od 52 dB u debljinama do 30 cm što su najčešći realni zatevi u građevinstvu.

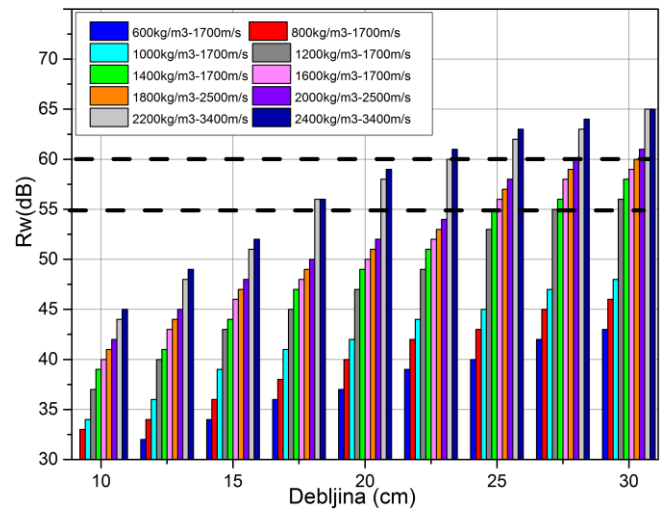
Povećane vrednosti izolacione moći od najmanje 55 dB praktično je moguće jedino ostvariti sa armirano betonskim zidovima koji imaju površinske mase veće od 2500 kg/m³ u raspoloživim gabaritima.

Isti rezultati prikazani su na slici 2 u funkciji debljine pregrade, gde se direktno može uočiti raspon vrednosti izolacione moći masivne pregrade iste debljine od različitih materijala.



Slika 1. Merodavne laboratorijske vrednosti izolacione moći za različite debljine materijala u funkciji njihovih gustina i odgovarajućih brzina longitudinalnih talasa

Betonski zidovi, iako zadovoljavaju i u manjim debljinama minimalne, pa čak i povećane kriterijume zvučne izolacije, nisu prihvatljivi na pozicijama razdvajanja dva korisnika, jer ne zadovoljavaju zahteve za termičku provodnost. Zbog toga se u varijanti masivnih zidova oni najčešće zamenjuju opekarskim šupljim blokovima.



Slika 2. Merodavne laboratorijske vrednosti izolacione moći za različite debljine materijala u funkciji njihovih gustina i odgovarajućih brzina longitudinalnih talasa

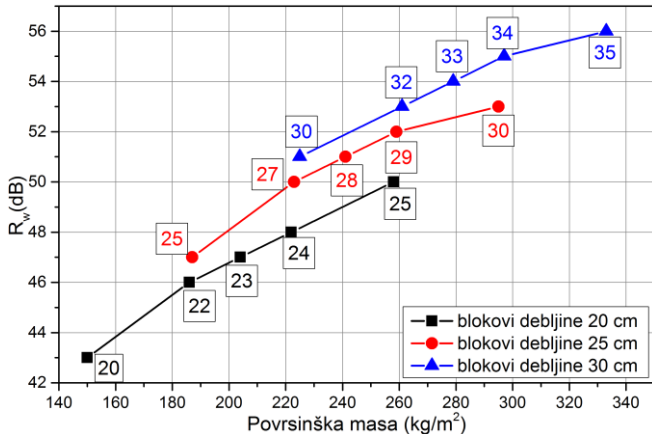
Opekarski blokovi su česti u projektantskoj praksi, jer oni zbog svoje porozne strukture, odnosno zbog prisustva vazdušnih komora, zadovoljavaju uslove termičke provodnosti propisane Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada [1]. Betonski zidovi koji sa manjim debljinama postižu iste vrednosti izolacionih moći, ne zadovoljavaju kriterijume toplotne izolacije i moraju se dodatno oblagati termoizolacionim materijalima. Takvi dodaci povećavaju debljinu zida i poskupljuju uslove gradnje.

Izolaciona moć zidanih zidova od šupljih opekarskih blokova zavisi od gustine osnovnog bloka, od debljine sloja maltera u završnoj obradi i od načina i preciznosti međusobnog spajanja blokova. Zbog neizostavnog postojanja šupljina prilikom spajanja blokova malterom, šuplji opekarski blokovi kao završni sloj moraju da imaju sloj maltera. U literaturi [13] je pokazano da tek sa slojem maltera ovakve pregrade postižu očekivane vrednosti izolacione moći. Pokrivanjem obe strane zida malterom taj nedostatak se eliminiše.

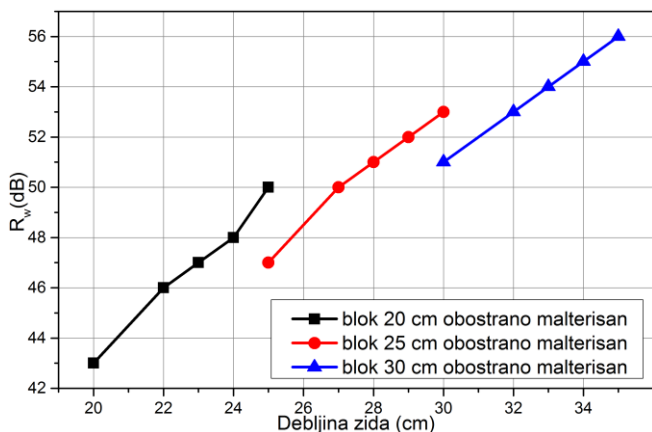
Zbog male gustine blokova (750 kg/m³) i veće gustine maltera (1800 kg/m³), ukupna površinska masa zida značajno varira u zavisnosti od debljine sloja maltera. Za brzinu longitudinalnih talasa u slučaju zidanih zidova od blokova iz literature [10] je usvojena vrednost od 2700 m/s. Analiziran je blok površinske mase 750 kg/m³ koji je obostrano malterisan u debljinama 2x1 cm, 2x1,5 cm, 2x2 cm i 2x2,5 cm. Gustina maltera je 1800 kg/m³.

Na slici 3 prikazana je promena vrednosti izolacione moći zida za blokove debljine 20, 25 i 30 cm, obostrano malterisane, u funkciji promene njegove ukupne površinske mase koja nastaje varijacijom debljine sloja maltera. U kvadratima je označena ukupna debljina zida u centimetrima nakon malterisanja (blok + malter). U projektovanju se često zahteva da zid ima neku zadatu debljinu zbog uticaja na kvadraturu prostorija, što može da dovede do stanjivanja debljine maltera. Iz tog razloga je analizirana promena

merodavne vrednosti izolacione moći istih zidova u funkciji ukupne debljine zida. Rezultat je prikazan na slici 4. Za iste vrednosti površinske mase varijacije vrednosti izolacione moći kreću se do 3 dB, dok se debljine materijala u tim situacijama razlikuju i do 7 cm. Za iste ukupne debljine zidova varijacije merodavnih laboratorijskih vrednosti izolacionih moći variraju do 3 dB.



Slika 3. Merodavne proračunske laboratorijske izolacione moći zidova od šupljih opekarskih blokova gustine 750 kg/m³ u tri debljine 20, 25 i 30 cm sa različitim debljinama maltera, u funkciji promene površinske mase.



Slika 4. Merodavne proračunske laboratorijske izolacione moći zidova od šupljih opekarskih blokova gustine 750 kg/m³ u tri debljine 20, 25 i 30 cm sa različitim slojem maltera, u funkciji promene debljine

III. POREĐENJE PRORAČUNATIH I IZMERENIH LABORATORIJSKIH VREDNOSTI IZOLACIONE MOĆI

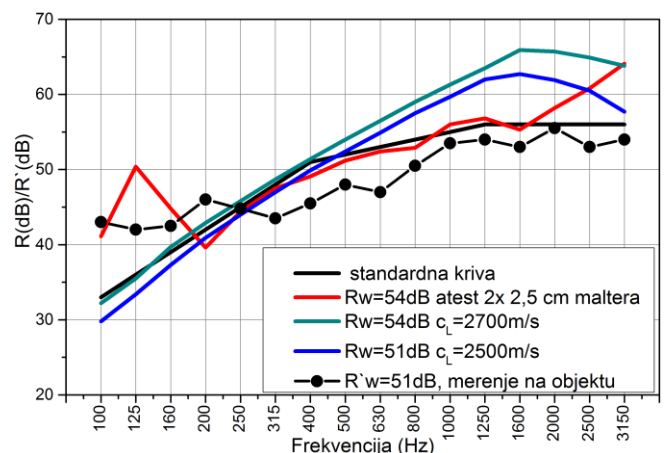
U situaciji kada nisu dostupni podaci o laboratorijskim merenjima, proračuni građevinskih merodavnih izolacionih moći homogenih masivnih zidova zasnivaju se na ulaznim podacima proračunatim prema Aneksu B standarda [7]. U takvim okolnostima neminovno se postavlja pitanje eventualnih razlika između vrednosti dobijenih takvim proračunom i onih koji se izmere u laboratoriji. Za analizu razlika uzeta su dva tipa zidova napravljenih od blokova. Posmatrani su zidovi za koje postoje atesti sa laboratorijskim vrednostima izolacione moći koji se mogu porediti sa proračunatim. To su zidovi napravljeni od blokova:

- 1- Porotherm 25 AKU (Wienerberger) debljine 25 cm
- 2- Silka 7DFrP debljine 20 cm.

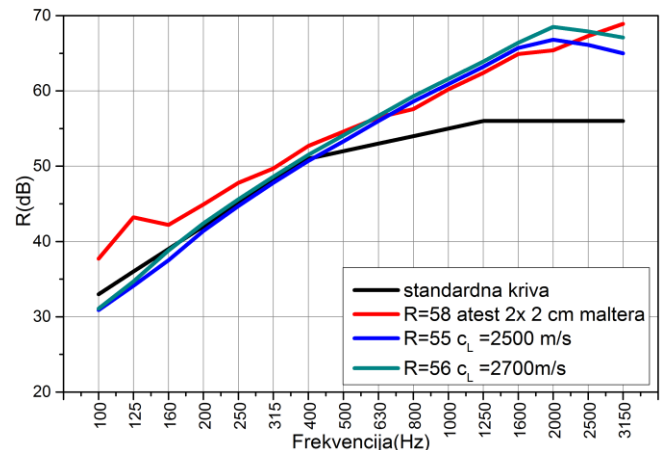
Prema tehničkoj dokumentaciji blok Porotherm tip 25AKU zajedno sa malterom koji je potreban za njegovo spajanje (bez završnog sloja na površini zida) ima

površinsku masu 265 kg/m². Kada je obostrano malterisan u slojevima 2x2,5 cm površinska masa mu je 373 kg/m². Laboratorijska vrednost preuzeta je iz atesta Zavoda za gradbeništvo Slovenije. Proračun izolacionih svojstava ovog zida izvršen je za dve vrednosti brzine longitudinalnih talasa od 2500 m/s i 2700 m/s. Za dodatno poređenje iskorišćena je izmerena vrednost građevinske izolacione moći ovog zida na jednom realnom objektu. Na slici 5 prikazane su ovako prikupljene izmerene i proračunate vrednosti izolacione moći zida.

Drugi primer zida koji je analiziran napravljen je od SILKA blokova tip 7DFrP. Ovaj blok je debljine 20 cm i obostrano je malterisan sa 2x2 cm. Gustina bloka je 1800 kg/m³. Ukupna površinska masa ovog zida je 432 kg/m². Poređenje laboratorijskih i izmerenih vrednosti prikazano je na slici 6.



Slika 5. Poređenje izmerenih i proračunatih vrednosti izolacione moći za zid izgrađen od blokova Porotherm 25AKU debljine 25 cm.



Slika 6. Poređenje izmerenih i proračunatih vrednosti izolacione moći za zid izgrađen od blokova Silka tip 7DFrP debljine 20 cm

Iz prikazanih rezultata se vidi da u slučaju zida od blokova Porotherm tip 25AKU postoji neslaganje u toku krive izolacione moći dobijenih merenjem i proračunom. One su verovatno posledica nehomogenosti bloka, zbog čega je njegovo ponašanje kompleksnije od modela na kome je zasnovan algoritam za proračun. Iz dobijenih komparativnih analiza proizilazi zaključak da je za zidove zidane od šupljih opekarskih blokova neophodno imati atest za izolacionu moć kao ulazni podatak za proračuna građevinske izolacione moći u zgradi. U slučaju silikatnog bloka Silka 7DFrP koji ima monolitnu unutrašnju strukturu,

izmerene i proračunate vrednosti se u većem delu frekvencijskog opsega podudaraju. Prikazani rezultati pokazuju da proračunate krive izolacione moći imaju veći nagib nego one izmerene u laboratoriji.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana su dva pitanja značajna za projektovanje zgrada u domenu zvučne izolacije. Jedno pitanje odnosi se na analizu izolacionih moći koje se mogu postići masivnim zidovima. Homogeni masivni zidovi koji se sreću u građevinskoj praksi su betonski zidovi, zidovi od lakih betonskih blokova, od silikatnih blokovi i od različitih opekarskih blokova. Masivni zidovi velikih gustina i u manjim debljinama postižu tražena izolaciona svojstva, međutim, takvi zidovi ne zadovoljavaju uslove toplotne provodljivosti. Sa druge strane različiti porozni betonski blokovi, kao i šuplji opekarski blokovi imaju zadovoljavajući koeficijent toplotne provodljivosti, ali zbog smanjene mase i smanjene brzine longitudinalnih talasa, ne mogu dostići zahtevani nivo zvučne izolacije. Analiza je pokazala da se u debljinama do 30 cm merodavne građevinske izolacione moći zidova od najmanje 52dB mogu postići samo sa materijalima čija je gustina veća od 1200 kg/m^3 , a da se povećana zvučna izolacija od 55dB može postići samo sa betonskim zidovima i to sa debljinama većim od 25 cm. S obzirom na to da betonski zidovi ne zadovoljavaju termičke zahteve, realizacija zidova koji imaju veća izolaciona svojstva moraju da se traže u rešenjima koja podrazumevaju dodatne lake obloge u vidu gips kartonskih ploča.

Drugo pitanje razmatrano u radu, vezano je za tačnost proračuna laboratorijske izolacione moći masivnih zidova kada su oni zidani od šupljih opekarskih blokova. Analiza sprovedena u radu, a i iskustvo iz projektantske prakse pokazalo je da su fizički procesi prenošenja zvuka kod nehomogenih struktura složeni i ne podležu do kraja fizičkim zakonima koji važe za homogene strukture.

Proračun krive laboratorijske izolacione moći u slučaju blokova koji imaju homogenu strukturu prati krivu izmerenih vrednosti. U slučaju šupljih opekarskih blokova, pojavljuje se razlika između proračunatih vrednosti i vrednosti izmerenih u laboratoriji. Javlja se razlike u nagibu krive frekvencijske zavisnosti izolacione moći. Kod opekarskih blokova kriva izolacione moći na srednjim frekvencijama ima nagib približno 5dB/oktavi, dok je nagib proračunske krive u istom opsegu približno 9dB/oktavi. Dešava se da su jednobrojne vrednosti dobijene na osnovu merenja i proračuna iste, i pored realtivno velikih razlika u toku i nagibu krive izolacione moći. To je razlog koji opravdava zapažanje koje je uočeno u praksi da zidovi od šupljih opekarskih blokova daju subjektivni osećaj nedovoljne izolovanosti pre svega u odnosu na govorni signal. Govorni signal u delu spektra iznad 250 Hz ima najveću energiju upravo u opsegu u kom zidovi od šupljih blokova imaju smanjene vrednosti izolacione moći. Analiza potvrde ovih subjektivnih zapažanja predmet je budućih analiza.

Može se zaključiti da je u projektovanju neophodno osim tipa pregradne konstrukcije definisati i minimalne vrednosti karakteristika materijala kako bi se obezbedilo da u slučaju promene proizvođača građevinskog materijala ne dođe do

značajne promene u izolacionim svojstvima. Preporuka je da se proračuni zasnivaju na atestiranim laboratorijskim merenjima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je napravljen kao deo istraživanja u okviru projekta broj TR36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada, „Službeni glasnik RS“ broj 61/2011)
- [2] SRPS UJ.6.201:1989 Akustika u zgradarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada
- [3] Birgit Rasmussen, „Acoustic classification of buildings in Europe – Main characteristics of national schemes for housing, schools, hospitals and office buildings“, Euronoise 2018 - Conference Proceeding, 1073-1080
- [4] ASTM E2638 – 10, "Standard Test Method for Objective Measurement of Speech Privacy Provided by a Closed Room“, 2017.
- [5] J.Bradley, B.Gover, "Speech Privacy Class for Rating the Speech Privacy of Meeting Rooms“, Canadian Acoustics, 36, 22-23 (2008)
- [6] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković, „Uticaj „tišine“ na zvučni komfor“, ETRAN 2019, Srebrno jezero
- [7] SRPS EN ISO 12354-1, „Akustika u građevinarstvu — Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata — Deo 1: Zvučna izolacija između prostorija“
- [8] SRPS EN ISO 12354-2, „Akustika u građevinarstvu — Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata — Deo 2: Izolacija od zvuka udara između prostorija“
- [9] SRPS EN ISO 12354-3, „Akustika u građevinarstvu – Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata — Deo 3: Zvučna izolacija od spoljašnjeg zvuka“
- [10] Carl Hopkins, „Sound insulation“, Elsevier, 2007.
- [11] J.H.Rindel, Sound Insulation in Buildings, CRC Press; 1 edition (October 31, 2017)
- [12] Vlatko Bosiljkov, Yuri Z.Totoev, John M. Nichols, „Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective“, Structural Engineering & Mechanics, May 2005
- [13] Aleksandar Milenković, Danica Boljević, Damir Savković, Stevka Baralić, „Uticaj malterisanja i malih otvora na zvučnu izolacionu moć zida“, Konferencija ETRAN-a, 2017.

ABSTRACT

Abstract — Acoustics comfort in buildings is provided by satisfying the minimum requirement of partition elements insulating properties. The selection of materials and methods of building construction changes over time. The changes are influenced by various factors in construction technology, economic factors and new requirements that are set to satisfy other types of comfort in buildings, mostly thermal comfort. Although the insulating properties of classical building materials are known and defined by the physical laws of sound propagation, in building construction there are constant changes that require pursuit for optimal configurations to meet different and often conflicting requirements in statics, economic sustainability, aesthetics, acoustic and thermal comfort. The paper presents analysis of insulation properties of widely used classical building materials as a function of their physical characteristics such as density, velocity of longitudinal waves, loss factors and thickness. The analysis is made to help in choosing the materials during design process to meet the sound insulation requirements.

Comparative analysis of insulation properties of building materials

Dragana Šumarac Pavlović, Ljiljana Popović, Miloš Bjelić

Analiza varijacija građevinskih izolacionih svojstava konstrukcija bazirana na arhivskim merenjima i proračunima

Ljiljana Popović, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Aleksandar Milenković, Danica Boljević

Apstrakt— Zvučni komfor u zgradama jedan je od elemenata ukupnog komfora koji treba zadovoljiti. Zbog specifične prirode zvuka i njegove percepcije, zvučni komfor je u subjektivnom smislu kvalitet koji čovek boravkom u zgradi najdirektnije percipira. S druge strane, povećanje izolacionih svojstava pregradnih konstrukcija uvodi ograničenja u izboru materijala i vodi ka promenama u ceni koštanja ili tehnologiji gradnje. Pod pritiskom takve realnosti u projektovanju se, po pravilu, ne uzima nikakva margina sigurnosti za izolacionu moć pregrada, već se usvajaju minimalne vrednosti da bi se pokazalo da je zvučni komfor obezbeđen. Posledica toga je da veliki broj zgrada izgrađenih u poslednjoj deceniji ima nedovoljnu zvučnu zaštitu. Da bi se ovaj problem sagledao, sprovedena je analiza bazirana na poređenju rezultata merenja u realnim zgradama i na njihovim proračunima. Izmerene vrednosti preuzete su iz arhive Instituta za ispitivanje materijala u Beogradu i Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Rezultati koji su korišćeni u ovoj analizi odnose se na tavanice od armiranog betona debljine 14-16 cm u stambenim i poslovnim zgradama građenim u periodu 1979-1990. godine.

Ključne reči—građevinska izolaciona moć, laboratorijska izolaciona moć, margina sigurnosti, zvučna izolacija.

I. UVOD

Preciznost merenja i proračuna u domenu zvučne izolacije u zgradama ima svoje posledice na sve aktere u procesu projektovanja, izgradnje i korišćenja zgrada. Povećanje zahtevane izolacione moći u nekim slučajevima vodi ka značajnim promenama u debljinama zidova, promeni materijala i načina gradnje. Poznavanjem granica merne nesigurnosti, nepreciznosti proračuna i rizika od grešaka u izvođenju, moguće je izvršiti pravilan izbor margine sigurnosti kojim će se smanjiti rizik nezadovoljstva zvučnim komforom kod krajnjih korisnika nekog prostora, a da se istovremeno zadovolji ekonomska strana gradnje. U zakonodavstvu Srbije minimalni uslovi za zvučnu izolaciju definisani su standardom SRPS UJ.6.201. U procesu

Ljiljana Popović, Stipendista Ministarstva, - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: ljilja95popovic@hotmail.com)

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs)

Miomir Mijić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: emijic@etf.rs)

Aleksandar Milenković – Institut za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: aleksandar.milenkovic@institutims.rs)

Danica Boljević – Institut za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: danica.boljevic@institutims.rs)

projektovanja polazi se od zahtevanih minimalnih terenskih izolacionih svojstava. Proračun terenskih izolacionih svojstava definisan je standardom SRPS EN 12354-1 [1]. Proračun uzima u obzir više faktora koji utiču na konačnu građevinsku izolacionu moć i kao ulazni podatak koristi laboratorijske ili proračunate vrednosti izolacione moći pojedinačnih pregradnih elemenata. Problem koji se javlja u praksi je da izmerena terenska izolaciona moć značajno odstupa od njene proračunate vrednosti. Vrednost manja od zahtevane minimalne vrednosti posledica je mnogo različitih faktora. Način da se prevaziđu takvi problemi je usvajanje neke margine sigurnosti pri definisanju potrebnih minimalnih uslova.

Mogući uzroci varijacije vrednosti terenske izolacione moći mogu se grubo podeliti na:

- mernu nesigurnost u procesu laboratorijskog i terenskog merenja izolacione moći;
- greške koja nastaje u procesu određivanja jednobrojne vrednosti, kao posledica zaokruživanja na celobrojnu vrednost;
- načina određivanja parametara u toku merenja;
- propusta u gradnji (odstupanje od projekta, ventilacioni otvori, prodori oko vrata i prozora itd.),
- nepreciznosti ulaznih podataka za proračun i same metodologije proračuna.

Merna nesigurnost u procesu merenja definisana je nizom standarda [2-4] koji definišu način utvrđivanja merne nesigurnosti kao i postupke laboratorijskog i terenskog merenja zvučne izolacije. Postoje neka immanentna svojstva zvučnog polja u zatvorenom prostoru koja dovode do relativno velike merne nesigurnosti u toku određivanja svih relevantnih parametara potrebnih za izračunavanje zvučne izolacije.

U različitim zemljama u više navrata su organizovani *Round Robin* testovi i međulaboratorijska ispitivanja sa ciljem da se utvrde svi aspekti merne nesigurnosti u procesu određivanja jednobrojne vrednosti zvučne izolacije. Rezultati ovih testova publikovani su u većem broju radova [5-8] i zavisno od eksperimentalne postavke te vrednosti merne nesigurnosti se kreću od 1 do 3 dB. Simmon u svom radu u kome su sumirani rezultati međulaboratorijskih merenja 8 laboratorija [5] konstatuje da je u slučaju masivnih zidova neophodno usvojiti marginu sigurnosti od 3 dB: Ovi eksperimenti omogućavaju procenu merne nesigurnosti svih pojedinačnih veličina koje se određuju u procesu merenja, kao i varijacije koje nastaju u procesu svođenja frekvencijski zavisnih veličina na jednobrojne vrednosti.

Standardima iz serije SRPS EN ISO 10140 [3] definisan je postupak merenja zvučne izolacije između susednih prostorija u zgradama. Procedura merenja izolacione moći pregrade od vazdušnog zvuka podrazumeva merenje nivoa zvuka u predajnoj prostoriji L_1 , prijemnoj prostoriji L_2 i merenje vremena reverberacije T . Pomoću Sabinovog obrasca izračunava se vrednost apsorpcije A u prijemnoj prostoriji:

$$A = 0,16 \cdot \frac{V_2}{T} [\text{m}^2], \quad (1)$$

gde je V_2 zapremina prijemne prostorije. Određivanja apsorpcije ima za cilj kvantifikovanje uticaja prijemne prostorije na nivo zvuka u njoj. Izmerena vrednost izolacione moći se dalje računa primenom izraza:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_{12}}{A} [\text{dB}], \quad (1)$$

gde je S_{12} površina pregrade čija izolaciona moć se meri. U praksi se pokazalo da nije uvek jednostavno jednoznačno definisati kolika je površina osnovne pregrade između dve prostorije. Takav slučaj je kada susedne prostorije nemaju konfiguraciju koja je definisana u standardu (bočni zidovi postavljeni simetrično sa obe strane pregrade).

U toku izgradnje objekta, često se javljaju razna odstupanja u odnosu na projektovano rešenje. Jedan od čestih slučajeva je promena građevinskog materijala koji ima isto generičko ime, ali različite fizičke karakteristike, što može imati posledice na nivo zvučne zaštite. Drugi važan element koji menja izolacione karakteristike pregradnih elemenata materijala su razni prodori za ventilacione otvore i slično, i one mogu značajno da degradiraju vrednost izolacione moći pregradnih konstrukcija. Može se proračunom pokazati da u zidu čija je izolaciona moć 57 dB i površina 10 m² otvor koji čini samo 0.001% njegove površine obara laboratorijsku izolacionu moć za čak 7 dB.

U procesu projektovanja, terenska izolaciona moć u zgradi proračunava se na bazi podataka o laboratorijskim vrednostima izolacionih moći pojedinačnih elemenata. U literaturi [9] je pokazano da na promene izračunatih vrednosti zvučne izolacije utiču nesigurnosti ulaznih parametara proračuna, kao što su gustina materijala, brzina longitudinalnih talasa, faktor unutrašnjih gubitaka, indeks prenosa vibracija.

Polazeći od svih navedenih uzroka koji dovode do razlika između projektovanih i izmerenih vrednosti zvučne izolacije, izvršena je analiza varijabilnosti izmerenih i proračunatih vrednosti na primeru tavanica koje se standardno koriste u građevinskoj praksi u našoj zemlji. Cilj je da se utvrde potrebne margine sigurnosti u zadavanju graničnih vrednosti.

U tu svrhu, a kao deo šireg istraživanja, formirana je digitalizovana baza rezultata merenja koja su u dugom vremenskom periodu izvršena u Institutu za ispitivanje materijala i u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Za potrebe analize koja je prikazana u ovom radu, izabrana su merenja izolacije od vazdušnog zvuka armirano betonskih tavanica u debljinama 14-16 cm. Merenja obuhvataju period u kome je u stambenoj izgradnji dominirao princip gradnje sa prefabrikovanim betonskim elementima [10]. Drugi deo analize odnosi se na analizu proračunatih vrednosti izolacionih moći tavanica koje

približno odgovaraju onima za koje postoje rezultati. Na bazi rezultata analize mernih podataka i proračuna, izvršena je analiza u frekvencijskom toku i standardnim odstupanjima izolacionih karakteristika.

II. BAZA ARHIVSKIH MERENJA

Pravljenje baze arhivskih merenja je bio neophodan korak kako bi se došlo do podataka o građevinskim izolacionim svojstvima pregrada. Podaci koji se nalaze u bazi dobijeni su iz arhive Instituta za ispitivanje materijala i Laboratorije za akustiku, Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Baza trenutno sadrži 582 merenja i njena izrada je još uvek u toku. Merenja su vršena u stambenim zgradama u periodu od 1979. do 1993. i 2003. do 2013. Većina merenja koja su urađena vršena su kako bi se utvrdilo da li pregrada zadovoljava uslove koji su tada bili zahtevani standardima. Podaci u bazi se prema tipu merenja mogu podeliti na ona kod kojih je merena izolaciona moć R' , izolacija od udarnog zvuka L' i normalizovana zvučna izolovanost D_n' . U tabeli I je prikazan broj merenja koji trenutno postoji u bazi za svaki od navedenih deskriptora zvučne izolacije. Izolaciona moć pregrade je merena i za tavanice i za zidove, dok su ostala merenja vršena samo kod tavanica.

TABELA I
BROJ MERENJA ZA ODREĐENE KOMBINACIJE PARAMETARA

Zidovi	Tavanice		
R'	R'	L_n'	D_n'
102	233	212	35

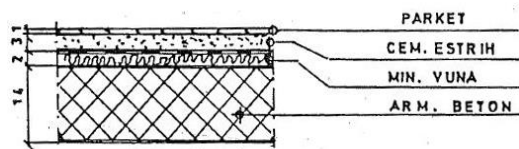
Merenja su vršena u 1/3 oktavnim frekvencijskim podopsezima od 100 Hz do 3150 Hz. Za svako merenje su pored rezultata merenja (jednobrajana i tabelarna vrednost zvučne izolacije) sačuvani i podaci o mestu i datumu merenja, površini i površinskoj masi pregrade, zapremini prijemne i predajne prostorije, opis pregrade i slika modela pregrade. Model pregrade je prikazan u vidu tabele u kojoj su redom zapisani građevinski materijali od kojih se sastoji pregrada ukoliko je višeslojna i debljine svakog od njih. Pored tabele su sačuvane i skice pregrade kao slike. Treba napomenuti da postoje merenja kod kojih nisu poznati svi navedeni podaci. Za potrebe ovog rada, izdvojen je jedan skup merenja za koje je postojao najveći broj poznatih podataka i njegov opis je dat u sledećem potpoglavlju.

A. Skup analiziranih podataka

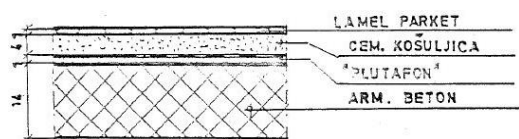
Analizirani skup čine merenja zvučne izolacije tavanica od vazdušnog zvuka koje kao osnovni građevinski materijal imaju armirani beton. Ova merenja su vršena u periodu 1979-1990. godine, kada je u Srbiji postojao trend primene industrijalizovanog načina građenja koji podrazumeva korišćenje prefabrikovanih armirano betonskih (AB) panela sa monolitizacijom elemenata bez elastičnih materijala na mestima kontakta [10]. Sve posmatrane tavanice imaju sloj plivajućeg poda u kome se između ploče i cementnog estriha nalaze vuna ili plutafon koji je u to vreme bio u širokoj upotrebi.

TABELA II
KARAKTERISTIKE SKUPA ANALIZIRANIH PODATAKA

Debljina AB	14 cm	15 cm	16 cm
Elastični sloj	Vuna	Plutafon	Vuna
Cementni estrih	3-5 cm		
Parquet	1 cm		



Slika 1. Skica AB ploče debljine 14 cm sa vunom u plivajućem podu



Slika 2. Skica AB ploče debljine 14 cm sa plutafonom u plivajućem podu

Modeli tavanica koji su analizirani u ovom radu prikazani su na slikama 1 i 2, a njihove karakteristike date su u tabeli II. Na obe slike se nalaze tavanice kod kojih je beton debljine 14 cm. Na slici 1 je tavanica kod koje je korišćena vuna, a na slici 2 tavanica kod koje je korišćen plutafon. Tavanice koje su analizirane se nalaze između stanova, ali se u bazi nalazi i jedan deo tavanica koje se nalaze na pozicijama gde se stan nalazi iznad prostorije druge namene (garaža, trafostanica i sl.). Zbog toga ispod sloja betona postoji termoizolacioni sloj u vidu spušenog plafona ili sloja stiropora, vune, tervola, durolita ili drugih materijala što predstavlja zanimljivu temu za neko sledeće istraživanje.

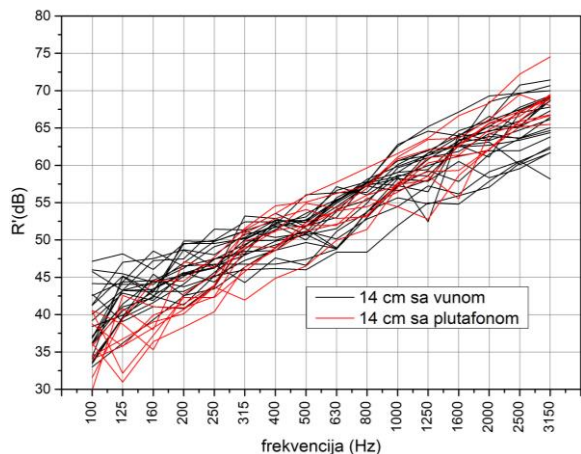
III. ANALIZE

A. Analiza izmerenih vrednosti građevinske izolacione moći

Najveći uzorak izmerenih građevinskih izolacionih moći je za tavanice debljine 14 cm. Krive izolacionih moći tavanica su prikazane na slici 3, a srednja jednobrojna vrednost ovih krivih, kao i opseg svih analiziranih vrednosti dat je u tabeli III.

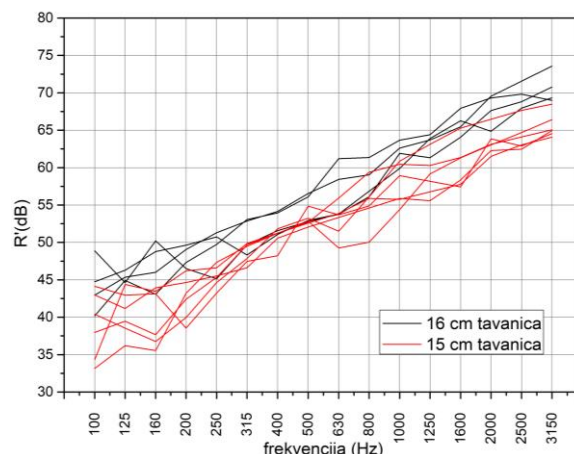
TABELA III
IZMERENE MERODAVNE GRAĐEVINSKE IZOLACIONE MOĆI ZA AB TAVANICE RAZLIČITIH DEBLJINA

Tavanica	R'_w min	R'_w max	R'_w mean	STD
14 cm elastični sloj vuna	52	58	55	2
14 cm elastični sloj plutafon	52	60	56	2
15 cm elastični sloj vuna	55	57	55	1
16 cm elastični sloj vuna	57	60	57	2



Slika 3. Izmerene građevinske izolacione moći tavanica debljine 14 cm sa plivajućim podom; posmatrane su dve varijante plivajućeg poda

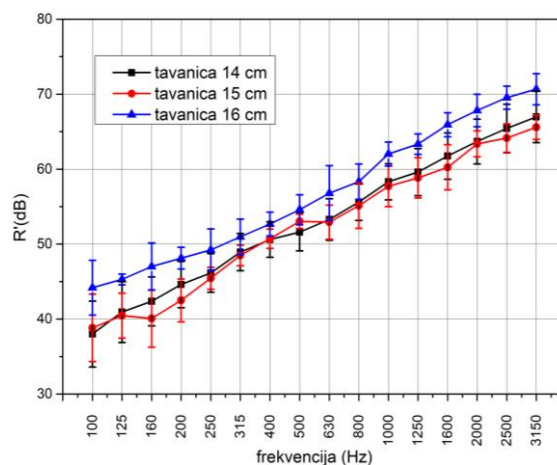
Tavanice debljina 15 i 16 cm su posmatrane za slučaj vune korišćene u elastičnom sloju i prikazane su na slici 4. Srednje jednobrojne vrednosti ovih krivih, kao i opseg svih analiziranih vrednosti se takođe nalazi u tabeli III.



Slika 4. Izmerene građevinske izolacione moći tavanica debljine 15 i 16 cm sa plivajućim podom u kome se kao elastični sloj nalazi vuna

Na slici 5 su prikazane srednje vrednosti i standardne devijacije za sve izmerene građevinske izolacione moći tavanica u debljinama 14, 15 i 16 cm. Iz tabele III se može primetiti da standardne devijacije u 3 od 4 prikazana slučaja ima istu vrednost, a mogući razlog manje vrednosti u preostalom slučaju je to što je za taj posmatrani slučaj bilo manje podataka u bazi nego za ostale slučajeve.

Izmerene vrednosti građevinskih izolacionih moći variraju u rasponu od 52 dB do 60 dB za tavanice debljine 14 cm, kao i za sve posmatrane debljine. U slučaju malih razlika u nominalnim debljinama tavanica od 2 cm možemo smatrati da u građevinskom smislu, odnosno u odnosu na preciznost građevinskih mera, sve analizirane tavanice da posmatramo da pripadaju istoj kategoriji. Dobijene standardne devijacije u izmerenim vrednostima odgovaraju rezultatima poznatim iz literature [2-4]. U posmatranom slučaju varijacije ne potiču samo od merne nesigurnosti terenskog merenja već i od razlika u konstruktivnim sistemima koji u arhivskim rezultatima merenja nisu dostupni kao podaci.



Slika 5. Srednje vrednosti i standardne devijacije za sve izmerene građevinske izolacione moći tavanica u debljinama 14, 15 i 16 cm

B. Analiza varijacija u građevinskim izolacionim svojstvima na bazi proračuna

Proračun građevinskih izolacionih moći tavanica je urađen u skladu sa standardom SRPS 12354-1 [1] pomoću softvera URSA [11]. Proračunom su obuhvaćene tavanice od 14 cm i 16 cm. U proračunu su uzete laboratorijske vrednosti izolacione moći dobijene merenjem. U proračunu su varirane debljine bočnih zidova, površine tavanice i bočnih zidova, kao i vrste spojeva. Pošto su arhivska terenska merenja vršena na objektima koji su građeni u periodu od 1979. do 1990. godine, u tom periodu najčešći konstruktivni sistemi su bili bazirani na montažnoj gradnji sa prefabrikovanim betonskim elementima. Zato je u analizi koja je sprovedena usvojeno da su bočni zidovi takođe betonski u debljinama 14 cm i 16 cm. U proračunu su varirane površine tavanice od 6 m² do 42 m². Posebno je izvedena analiza za elastične i čvrste krstaste spojeve. Sprovedena analiza imala je za cilj da utvrdi kolike se varijacije mogu očekivati na bazi proračuna, kada je proračun zasnovan na laboratorijskim vrednostima izolacionih moći pregrada.

U tabelama IV i V prikazane su jednobrojne vrednosti građevinske izolacione moći dobijene za sve posmatrane kombinacije. Date su vrednosti građevinske izolacione moći za razne kombinacije i za svaku varijantu data je i jednobrojna vrednost izolacione moći direktne putanje kroz glavnu pregradu, tavanicu. Na slikama 6 i 7 prikazane su krive izolacionih moći armirano betonskih tavanica u debljini od 14 cm i 16 cm sa svim prethodno navedenim varijacijama.

TABELA IV

MERODAVNA GRAĐEVINSKA IZOLACIONA MOĆ ZA ARMIRANO BETONSKU TAVANICU DEBLJINE 14 cm

Tavanica 14 cm	42 m ²		6 m ²	
	R' _w	D _{dw}	R' _w	D _{dw}
Zidovi 14 cm elastični spoj	57	60	59	64
Zidovi 14 cm čvrsti spoj	54	57	55	60
Zidovi 16 cm elastični spoj	59	62	60	66
Zidovi 16 cm čvrsti spoj	55	59	56	62

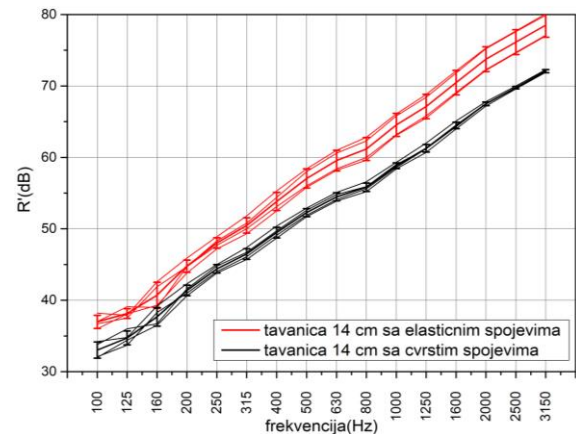
TABELA V

MERODAVNA GRAĐEVINSKA IZOLACIONA MOĆ ZA ARMIRANO BETONSKU TAVANICU DEBLJINE 16 cm

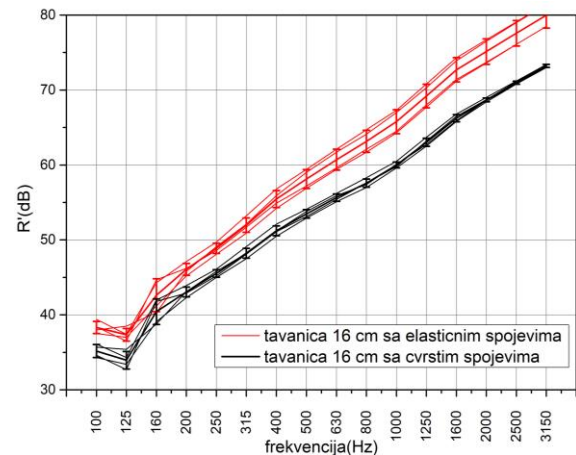
Tavanica 16 cm	42 m ²		6 m ²	
	R' _w	D _{dw}	R' _w	D _{dw}
Zidovi 14 cm elastični spoj	58	60	60	64
Zidovi 14 cm čvrsti spoj	54	60	55	59
Zidovi 16 cm elastični spoj	59	62	61	66
Zidovi 16 cm čvrsti spoj	56	59	57	62

U slučaju čvrstih spojeva između tavanice i bočnih pregrada, što je karakteristično u građevinskoj praksi na području naše zemlje, varijacije u proračunatim građevinskim vrednostima kreću se u rasponu od 1 do 2 dB. Gledano po frekvencijama, najveće razlike se javljaju na niskim frekvencijama i one su posledica pomeranja frekvencije koincidencije sa promenom površinske mase pregrada. U slučaju elastičnih spojeva, veće su varijacije po frekvencijama, naročito na višim frekvencijama koje sa druge strane nemaju značajnu implikaciju na jednobrojne vrednosti koje i u ovom slučaju variraju u rasponu od 1 do 2dB. U proračunima nisu prikazane varijacije koje

potiču od različitih tipova plivajućeg poda pošto je pokazano da je uticaj ovih razlika zanemarljiv kada je u pitanju prenos vazdušnog zvuka.



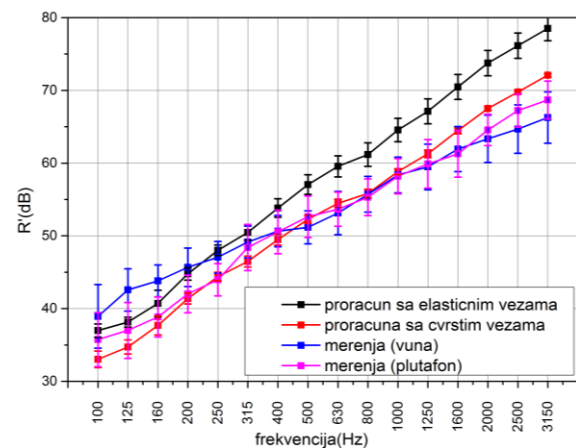
Slika 6. Proračun izolacione moći tavanice debljine 14 cm za različite debljine zidova i vrste spojeva



Slika 7. Proračun izolacione moći tavanice debljine 16 cm za različite debljine zidova i vrste spojeva

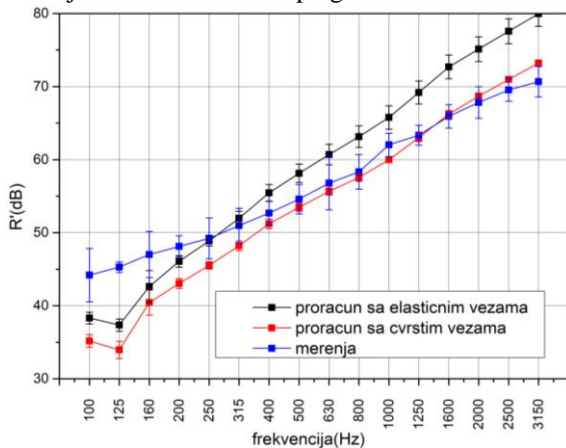
C. Komparativna analiza proračunatih i izmerenih vrednosti građevinskih izolacionih moći

Poređenje proračunatih i izmerenih srednjih vrednosti građevinskih izolacionih moći urađeno je za slučaj tavanica sa armirano betonskom pločom debljine 14 cm i 16 cm. U prvom slučaju posmatrane su tavanice debljine 14 cm koje imaju kao elastični sloj vunu ili plutafon.



Slika 8. Poređenje proračunatih i izmerenih srednjih vrednosti građevinskih izolacionih moći za tavanice debljine 14 cm

Usporedni rezultati merenja i proračuna prikazani su na slici 8. Relativno dobro poklapanje, u okvirima standardne devijacije rezultata merenja, pokazuju merenja tavanica sa plutačnom u plivajućem podu i proračuni tavanica sa čvrstim spojevima. Ovi rezultati potvrđuju činjenicu da se u građevinskoj praksi toga vremena gradilo isključivo sa čvrstim spojevima. Sa prikazanog grafika može se uočiti da izmerene krive izolacione moći imaju manji nagib od krivih dobijenih proračunom, iako su kao ulazni podaci korišćene laboratorijske vrednosti za sve pregradne elemente.



Slika 9. Poređenje proračunatih i izmerenih srednjih vrednosti građevinskih izolacionih moći za tavanice debljine 16 cm

Za tavanice debljine 16 cm (slika 9) u najvećem delu frekvencijskog opsega (400 - 3150 Hz) male su razlike između izmerenih i proračunatih vrednosti, iako se i u ovom slučaju uočava manji nagib frekvencijske zavisnosti izmerenih vrednosti. Najveća odstupanja javljaju se na najnižim frekvencijama i tačan uzrok ovih razlika mora biti predmet detaljnijih analiza.

IV. ZAKLJUČAK

Prikazana analiza izmerenih vrednosti građevinske izolacione moći i proračunatih vrednosti tavanica koje su karakteristične za građevinsku praksu u našoj zemlji potvrdila je polaznu hipotezu da se u definisanju minimalnih kriterijuma mora uzeti margina sigurnosti. Prikazana analiza pokazuje da je ta margina minimalno 2 dB.

U slučaju kada se građevinska izolaciona moć proračunava na osnovu laboratorijskih vrednosti izolacione moći pojedinačnih pregrada, varijeteti u dimenzijama prostorija, strukturi bočnih zidova, vrsti spojeva u okviru proračuna ne odlikavaju realne razlike u ostvarenim izolacionim karakteristikama tavanica, jer ne mogu da uzmu u obzir sve uzroke narušavanja zvučne izolacije koje su neminovne u izgradnji. Polazeći od laboratorijskih vrednosti izolacije, u proračunu nije moguće uneti varijacije koje mogu nastati zbog razlike u stvarnim karakteristikama građevinskih materijala, kao što su pre svega gustina i brzina longitudinalnih talasa koji figurišu kao ulazni parametri za proračun karakteristike spojeva, strukturnog vremena reverberacije u pregradama i slično. Ova analiza je pokazala da u slučaju čvrstih spojeva, građevinska izolaciona moć jedne tavanice varira u opsegu od 1 dB, kao posledica različitih konfiguracija.

Sa druge strane, iste izmerene građevinske izolacione moći za nominalno iste tavanice variraju u opsegu od ± 4 dB

sa standardnim devijacijama od 2dB za sve posmatrane slučajeve kod kojih je baza izmerenih vrednosti imala dovoljan broj uzoraka.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je napravljen kao deo istraživanja u okviru projekta broj TR36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] SRPS EN 12354-1: 2008 Akustika u građevinarstvu - Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata - Deo 1: Zvučna izolacija između prostorija
- [2] SRPS EN ISO 12999:2016, Akustika – Određivanje i primena merne nesigurnosti u građevinskoj akustici
- [3] SRPS EN ISO 10140 -1.2.3,4,5:2013, Akustika — Laboratorijska merenja zvučne izolacije građevinskih elemenata
- [4] SRPS EN ISO 717-1:2015, Akustika — Ocena zvučne izolacije u zgradama i zvučne izolacije građevinskih elemenata
- [5] C. Simmons, "Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings — results of a round robin test", *NoiseControl Engr. J.*, 55(1), 67–75, (2007).
- [6] J. Lang, "A round robin on sound insulation in building", *Applied Acoustics*, 52(3/4), 225–238, (1997).
- [7] V. Wittstock, "On the Uncertainty of Single-Number Quantities for Rating Airborne Sound Insulation" *Acta Acustica united with Acustica*, 93, 375-386, (2007).
- [8] C. Scrosati, F. Scamoni, M. Bassanino, M. Mussin, G. Zambon "Uncertainty analysis by a Round Robin Test of field measurements of sound insulation in buildings Single numbers and low frequency bands evaluation -Airborne sound insulation" *Noise Control Engr. J.* 61
- [9] D. Mašović, Dragana Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Uticaj pojedinih fizičkih parametara na tačnost proračuna zvučne izolacije prema standardima EN 12354“, 57. ETRAN 2013, Zlatibor, Srbija, Jun, 2013.
- [10] Lj. Đukanović, „Tipologija i valorizacija građevinske strukture stambenih zgrada Beograda sa stanovišta komfora stanovanja“, Doktorska disertacija, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2015
- [11] URSA FRAGMAT AKUSTIKA, softver za proračun zvučne izolacije, Elektrotehnički fakultet, Beograd, <http://www.ursa.rs/sr-latn-cs/arhitekti/stranice/program-akustika.aspx>

ABSTRACT

Acoustic comfort in buildings is one of the elements of total comfort which buildings have to meet. Due to the specific nature of sound and its perception, subjective experience of acoustic comfort is an element which people tend to perceive most directly. On the other hand, the increase of the partitions insulating properties introduces restrictions in material selection and therefore leads to changes in buildings' cost or construction technology. Under the pressure of such a reality, as a rule, no safety margin is taken in design process for partitions' insulating properties and minimal values are accepted as a proof that sound comfort is provided. As the result of this approach, a large number of buildings constructed in the last decade have unsatisfactory sound insulation levels. To address this problem, an analysis was conducted based on a comparison of measurement results in real buildings and their calculations. The measured values were collected from the archives of the Institute for Testing of Materials in Belgrade and the Acoustics Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade. The results used in this analysis refer to 14-16 cm thick reinforced concrete floors in residential and commercial buildings built in the period 1979-1990.

Analysis of variations of building insulation properties of structures based on archive measurements and calculations

Ljiljana Popović, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Aleksandar Milenković, Danica Boljević

Uticaj različitih tipova pragova na zvučnu izolaciju vrata

Aleksandar Milenković, Danica Boljević i Damir Savković, *Institut IMS Beograd*

Apstrakt—U savremenoj građevinskoj praksi interesantno je da se poslednjih godina teži izbacivanju klasičnih fiksnih pragova i upotrebi tzv. padajućih pragova kod izvedbe vrata. Prilikom projektovanja arhitekta u poslednje vreme u većini slučajeva projektuju ulazna vrata u hotelske sobe bez fiksnog praga, iz estetskih prohteva, ali prvenstveno zbog činjenice da fiksni prag smeta pri svakodnevnoj upotrebi prtljaga sa točkovima pri ulasku i izlasku iz hotelske sobe. U radu su prikazani rezultati serije laboratorijskih merenja izolacije od vazdušnog zvuka jednog tipa ulaznih vrata sa varijacijama padajućih pragova i fiksnog praga. Ispitivanja su izvršena u skladu sa serijom standarda za laboratorijska ispitivanja izolacije od vazdušnog zvuka u građevinarstvu, SRPS EN ISO 10140.

Ključne reči—Vrata, izolacija od vazdušnog zvuka, fiksni prag, padajući prag.

I. UVOD

Ideja za seriju ispitivanja uticaja vrste praga i njegove instalacije u vrata i sistema primene kod zatvaranja vrata potekla je iz ispitivanja izolacije od vazdušnog zvuka u laboratorijskim uslovima jednih vrata namenjenih za ugradnju na ulazu u hotelsku sobu jednog od prestižnih hotela u Beogradu.

Vrata su projektovana tako da u sebi sadrže sistem padajućih pragova koji se podižu pri otvaranju vrata i spuštaju pri zatvaranju vrata.

Zadatak ispitivanja je bio da se pokaže da li ti padajući pragovi imaju i koliko uticaja na zvučnu izolaciju vrata i da li padajući pragovi zaista mogu da zamene uobičajeni fiksni prag.

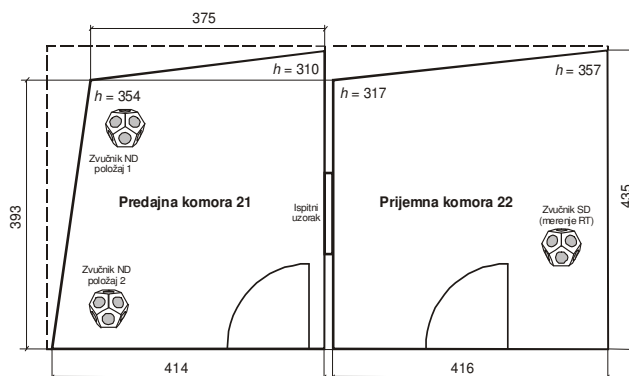
Ispitivanje vrata je sprovedeno u laboratorijskim uslovima u ispitnim komorama 21 i 22 Laboratorije za akustiku i vibracije Instituta IMS u Beogradu. Izgled ovih prostorija sa ugrađenim uzorkom između njih prikazan je na Sl. 1.

Uzorak vrata koji je bio predmet ispitivanja ugrađen je u ispitni otvor tako da je njegova spoljašnja strana okrenuta prema komori koja je tokom ispitivanja bila predajna.

Aleksandar Milenković, magistar informatičkih naura, vodeći diplomirani inženjer u Institutu za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Republika Srbija (e-mail: aleksandar.milenkovic@institutims.rs).

Danica Boljević, diplomirani inženjer elektrotehnike, vodeći diplomirani inženjer u Institutu za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Republika Srbija (e-mail: danica.boljevic@institutims.rs).

Damir Savković, diplomirani inženjer informatike, samostalni diplomirani inženjer u Institutu za ispitivanje materijala ad, Bulevar vojvode Mišića 43, 11000 Beograd, Republika Srbija (e-mail: damir.savkovic@institutims.rs).



Sl. 1. Horizontalni presek ispitnih komora u Laboratoriji za akustiku i vibracije.

Ispitivanje je izvršeno kao ispitivanje zvučne izolacione moći u skladu sa relevantnim standardima koji regulišu postupke laboratorijskih ispitivanja zvučne izolacije [1,2,3,4,5].

Ispitivanje nivoa zvučnog pritiska je izvršeno za dva položaja zvučnika u predajnoj prostoriji u po 6 mernih tačaka (pozicija mikrofona) u predajnoj i prijemnoj prostoriji, a izmerene vrednosti nivoa zvučnog pritiska su logaritamski usrednjene kako bi se dobile vrednosti nivoa zvučnog pritiska u predajnoj i prijemnoj prostoriji potrebnih za proračun zvučne izolacione moći. Vreme reverberacije u prijemnoj prostoriji je izvršeno za dva položaja zvučnika u 3 merne tačke (pozicije mikrofona). Za svaku mernu tačku napravljena su po dva zapisa krive opadanja nivoa zvuka i na osnovu 12 krivih opadanja određena je srednja vrednost vremena reverberacije potrebna za proračun. Ispitni uzorak je bio površine 2 m^2 , a zapremine ispitnih komora 55.48 m^3 (predajna komora) i 59.85 m^3 (prijemna komora). Ispitivanje je izvršeno u frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 5000 Hz.

U radu su prikazani rezultati po frekvencijama (R) i kao merodavna izolaciona moć (R_w).

II. PREDMET ISPITIVANJA

Predmet ispitivanja su vrata prikazana na fotografiji na Sl. 2. Fotografije su napravljene iz predajne i iz prijemne ispitne komore. Vrata su ugrađena na način kako se ugrađuju na objektu. U plot sa donje strane ugrađen je padajući prag koji se prilikom zatvaranja vrata automatski spušta. U vrata koja su bila predmet ispitivanja ugrađena su četiri padajuća praga i to tri unutrašnja padajuća praga ugrađena u sam plot i jedan spoljašnji koji je montiran na plot sa spoljašnje strane vrata.



Sl. 2. Predmet ispitivanja: Vrata.

Prilikom ispitivanja u zoni praga postavljena je glatka tanka ploča od lesonita kako bi se obezbedilo dobro zaptivanje sa podom prilikom spuštanja padajućih pragova.

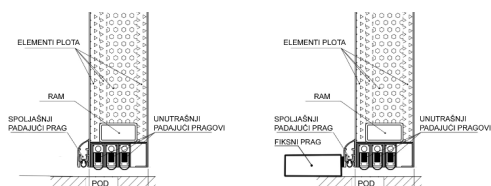
Najpre je urađena jedna serija ispitivanja samo sa padajućim pragovima, a zatim je u drugoj seriji dodat je u zoni spoljašnjeg padajućeg praga i klasični fiksni prag od punog drveta. Na fiksni prag je na strani vrata postavljen i standardni dihtung.

Ispitivanje je sprovedeno za različite kombinacije u broju padajućih pragova kao i njihove kombinacije sa montiranim fiksnim pragom.

Polazna tačka ispitivanja su vrata bez bilo kakvog praga, a zatim su tokom ispitivanja dodavani najpre jedan unutrašnji padajući prag (1 unutrašnji PP), zatim drugi unutrašnji padajući prag (ukupno 2 unutrašnja PP), zatim treći unutrašnji padajući prag (ukupno 3 unutrašnja PP) i na kraju i četvrti ovog puta sa spoljašnje montiran padajući prag (ukupno 3 unutrašnja i 1 spoljašnji PP).

Ispitivanje je ponovljeno sa istom kombinacijom broja padajućih pragova (PP) i montiranim fiksnim pragom (FP).

Karakteristični detalji u zoni praga ispitivanih vrata sa padajućim pragovima bez montiranog fiksnog praga kao i sa montiranim fiksnim pragom prikazani su na Sl. 3.



Sl. 3. Detalji vrata u delu praga: izgled padajućih pragova kada su podignuti i izgled podignutih padajućih pragova u kombinaciji sa fiksnim pragom.

III. PRIKAZ REZULTATA

Rezultati ispitivanja su prikazani tako što su grupisani na dva načina.

Prvo su grupisani rezultati bez bilo kakvog praga i sa dodavanim jednim unutrašnjim padajućim pragom (1 unutrašnji PP), sa drugim unutrašnjim padajućim pragom (ukupno 2 unutrašnja PP), sa trećim unutrašnjim padajućim pragom (ukupno 3 unutrašnja PP) i na kraju sa četvrtim spoljašnjim padajućim pragom (ukupno 3 unutrašnja i 1 spoljašnji PP). Ovi rezultati su uporedno prikazani u Tabeli 1 i na dijagramu na Sl. 4.

TABELA 1
IZMERENE VREDNOSTI ZVUČNE IZOLACIONE MOĆI SA VARIJACIJAMA BROJA PADAJUĆIH PRAGOVA

f (Hz)	R (dB) bez pragova	R (dB) sa 1 unutr. PP	R (dB) sa 2 unutr. PP	R (dB) sa 3 unutr. PP	R (dB) sa 3 unutr. i 1 spolj. PP
100	32.2	32.5	33.6	33.2	33.2
125	30.5	32.5	34	32.9	33.4
160	34.1	35.6	37.1	35.3	37
200	33.1	37.2	38.9	37.9	39.1
250	32.9	36.7	40.4	40.1	40.6
315	28.9	32.4	36.4	36.8	37.4
400	27.1	30.3	34.1	33.7	35.8
500	27.3	30.5	33.6	33.5	35.5
630	26.6	30.4	33.6	34.9	36.9
800	25.7	28.9	33	35.6	37.7
1000	28	30.2	36.8	39.7	40.5
1250	28.8	30	36.5	37.8	39.8
1600	30.5	34.1	40.4	40.8	43.5
2000	34.2	38.9	44.4	45.1	46
2500	41	44.6	48	48.1	48.3
3150	36.1	44	47.6	46.7	49.2
4000	33.4	39.8	45	44.5	47.9
5000	31.4	40.5	43.6	44.4	46.3
R_w (dB)	30	33	38	39	41

Zatim su rezultati grupisani samo sa fiksnim pragom (FP) i u kombinaciji fiksnog praga sa jednim unutrašnjim padajućim pragom (FP + 1 unutrašnji PP), zatim sa drugim unutrašnjim padajućim pragom (FP + 2 unutrašnja PP), pa sa trećim unutrašnjim padajućim pragom (FP + 3 unutrašnja PP) i na kraju sa četvrtim spoljašnjim padajućim pragom (FP + 3 unutrašnja i 1 spoljašnji PP). Ovi rezultati su prikazani u Tabeli 2 i na dijagramu na Sl. 5.

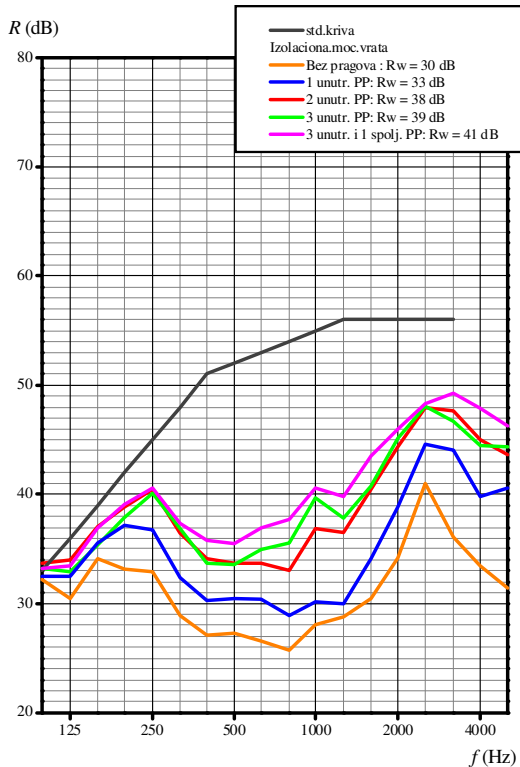
TABELA 2
IZMERENE VREDNOSTI ZVUČNE IZOLACIONE MOĆI U KOMBINACIJI VARIJACIJA BROJA PADAJUĆIH PRAGOVA I FIKSNOG PRAGA

f (Hz)	R (dB) sa FP	R (dB) sa FP i 1 unutr. PP	R (dB) sa FP i 2 unutr. PP	R (dB) sa FP i 3 unutr. PP	R (dB) sa FP i 3 unutr. i 1 spolj. PP
100	33.4	32.1	32.9	32.9	34.4
125	32.4	33	32.7	32.9	34.6
160	37	36.8	36.2	36.6	37.8
200	37.9	38.2	38.4	38.4	39.3
250	35.5	38.6	40.2	41.3	41.8
315	33.1	36.6	38.1	40.3	41.6
400	31.6	35.7	36.6	37.3	39.4
500	32.8	37.5	39	40.4	40.4
630	33.8	39.2	41.7	43.8	43.2
800	34.2	39.6	42	43.7	43.3
1000	36	39.7	43	44	44.3
1250	36	40.2	43	44.3	45.1
1600	38.5	42.5	46.5	47.8	47.9
2000	41.8	45.5	48.7	49.7	49.8
2500	45.9	49.2	51	51.5	51.4
3150	49.4	52.3	52.5	53.4	52.7
4000	49	51.5	51.5	51.9	52
5000	48.8	52.1	52	52.7	52.2
R_w (dB)	37	41	44	45	45

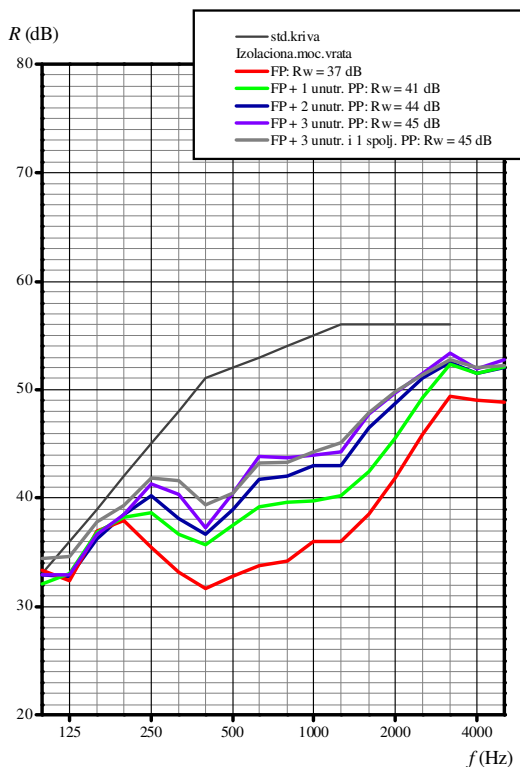
IV. KOMENTAR NA DOBIJENE REZULTATE

Rezultati su pokazali, iako se to nije očekivalo jer je namera projektanta vrata bila takva, da se ipak najbolja zvučna izolacija vrata ostvaruje tek korišćenjem padajućih pragova u kombinaciji sa fiksnim pragom.

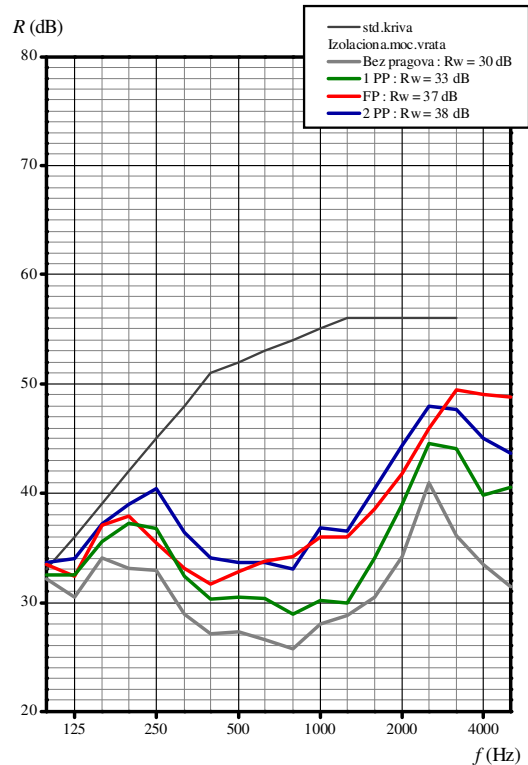
Padajući pragovi kada se koriste samostalno mogu da zamene uobičajeni (klasični) fiksni prag s tim da nije dovoljno koristiti jedan već najmanje dva padajuća praga koja se istovremeno koriste kako bi se postigla zvučna izolacija istog reda veličine. Ilustracija ovoga je prikazana na dijagramu na Sl. 6.



Sl. 4. Izmerene vrednosti zvučne izolacione moći vrata sa varijacijama broja padajućih pragova.



Sl. 5. Izmerene vrednosti zvučne izolacione moći vrata u kombinaciji varijacija broja padajućih pragova i fiksnog praga.



Sl. 6. Izmerene vrednosti zvučne izolacione moći vrata u kombinaciji varijacija broja padajućih pragova i fiksnog praga u odnosu na izmerenu vrednost bez bilo kakvog praga.

Međutim, čak ni upotreba dva plivajuća praga kao zamena za uporebu fiksnog praga ne doprinosi zvučnoj izolaciji u dovoljnoj meri da bi zahtevi u pogledu zvučne izolacije koje projektant postavlja pred građevinski proizvod kakva su vrata bili zadovoljeni (uobičajeno su $R_w > 40$ dB). Tek četiri padajuća praga kada se istovremeno koriste mogu doprineti da vrata kakva su bila predmet ovog ispitivanja mogu da zadovolje projektantski uslov.

Ipak, kolika god je želja projektanta vrata da izbace iz upotrebe fiksni prag velika, tek upotreba padajućih pragova u kombinaciji sa fiksnim pragom može zadovoljiti projektantske uslove kakvi se postavljaju pred projektante ulaznih vrata u hotelske sobe, jer treba imati u vidu i da takva vrata kada se ugrade u zid sobe treba da zadovolje uslov za ukupnom zvučnom izolacijom takvog zida koja je takođe predviđena projektanim rešenjem za specifični objekat kakav je hotel [6], a

čega projektanti vrata moraju da budu svesni.

Pri tome arhitekta treba da projektuju i takve zone ispod vrata da budu potpuno glatke kako bi plivajući pragovi potpuno nalegali na pod, jer u suprotnom padajući prag neće imati svoju svrhu a to je da zatvori put prolaska zvuka iz spoljašnjeg prostora u unutrašnji prostor sobe.

Ovo je posebno značajno kao i celokupna izvedba ugradnje vrata na samom objektu, jer uvek treba imati u vidu da se najbolji (idealni) rezultati dobijaju u laboratoriji dok su na terenu rezultati za isti građevinski proizvod sa nižim vrednostima zvučne izolacije, a što najviše zavisi od same izvedbe vrata, kako od spoja sa otvorom tako i sa vrstom zida u koji se ugrađuju, a naročito bočnog provođenja zvuka kojeg u laboratorijskim uslovima nema.

I na kraju je interesantno, a što je i za očekivati, da dodavanje padajućih pragova ne može beskonačno doprineti poboljšanju zvučne izolacije vrata. U jednom trenutku će dominantan uticaj na zvučnu izolaciju preuzeti sam plot vrata i dodavanje većeg broja padajućih pragova neće imati smisla.

V. ZAKLJUČAK

Iz prikazanih rezultata ispitivanja jasno se vidi da se najbolja zvučna izolacija dobija upotrebom kombinovanih doprinosa fiksnog praga i padajućih pragova. Ovakvom kombinacijom je moguće ostvariti maksimalnu zvučnu izolaciju za dati plot vrata.

Ispitivanja sistematizovana u ovom radu su pokazala da upotreba fiksnog praga daje već vrednosti zvučne izolacije od padajućeg praga i da tek istovremena upotreba dva padajuća praga može zameniti jedan fiksni prag, naravno pod uslovom da plivajući pragovi skoro idealno prijanjaju za podlogu.

Time je pokazano da upotreba jednog padajućeg praga, pa čak i dva ili tri plivajuća praga, uglavnom ne zadovoljava zahteve za zvučnom izolacijom hotelskih vrata, s obzirom na to da su zahtevi za vrednošću zvučne izolacije vrata R_w u poslednje vreme veći od 40 dB.

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 10140-1:2017, Akustika — Laboratorijska merenja zvučne izolacije građevinskih elemenata — Deo 1: Pravila primene za određene proizvode
- [2] SRPS EN ISO 10140-2:2013, Akustika — Laboratorijska merenja zvučne izolacije građevinskih elemenata — Deo 2: Merenje izolacije od vazdušnog zvuka
- [3] SRPS EN ISO 10140-4:2013, Akustika — Laboratorijska merenja zvučne izolacije građevinskih elemenata — Deo 4: Procedure merenja i zahtevi
- [4] SRPS EN ISO 3382-2:2010, Akustika — Merenje akustičkih parametara u prostoriji - Deo 2: Vreme reverberacije u običnim prostorijama
- [5] SRPS EN ISO 717-1:2015, Akustika — Utvrđivanje zvučne izolacije u zgradama i zvučne izolacije građevinskih elemenata — Deo 1: Izolacija od vazdušnog zvuka.
- [6] SRPS UJ.6.201:1990 Akustika u zgradarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada.

ABSTRACT

In modern construction practice, it is interesting that in recent years there has been a tendency to eliminate the classic fixed seal and use the so-called. drop down seal in door design. Lately architects in most cases design the entrance door to hotel rooms without a fixed seal, for aesthetic reasons, but primarily due to the fact that a fixed seal interferes with the daily use of luggage with wheels when entering and leaving the hotel room. The paper presents the results of a series of laboratory measurements of airborne sound insulation of one type of entrance door with variations of fixed seal and drop down seals. The tests were performed in accordance with a series of standards for laboratory tests of airborne sound insulation SRPS EN ISO 10140.

Influence of different types of seals to the sound insulation of the doors

Aleksandar Milenkovic, Danica Boljevic, Damir Savkovic