



MONOGRAFIA
POLSKIEGO TOWARZYSTWA AKUSTYCZNEGO
ODDZIAŁ W KRAKOWIE

AKTUALNOŚCI
INŻYNIERII AKUSTYCZNEJ
I BIOMEDYCZNEJ

REDAKCJA
KATARZYNA SUDER-DEBSKA

Kraków 2018

MONOGRAFIA
POLSKIEGO TOWARZYSTWA AKUSTYCZNEGO
ODDZIAŁ W KRAKOWIE



AKTUALNOŚCI
INŻYNIERII AKUSTYCZNEJ
I BIOMEDYCZNEJ

REDAKCJA
KATARZYNA SUDER-DĘBSKA

Kraków 2018

Monografia Polskiego Towarzystwa Akustycznego Oddział w Krakowie

Komitet naukowy:

Przewodniczący: Prof. dr hab. inż. Jerzy Wiciak

Dr hab. inż. Adam Brański prof. PRz

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Dr hab. Barbara Gambin, prof. IPPT PAN

Prof. dr hab. inż. Grażyna Grelowska

Dr hab. Tadeusz Kamiński, prof. AGH

Dr hab. Janusz Kompała, prof. GIG

Prof. dr hab. inż. Piotr Kleczkowski

Dr hab. inż. Marek Kozielnik prof. PK

Dr hab. inż. Lucyna Leniowska, prof. UR

Dr hab. inż. Dariusz Pleban, prof. CIOP-PIB

Dr hab. inż. Leszek Radziszewski, prof. PŚw

Prof. dr hab. inż. Wojciech Rdzanek

Dr hab. Ewa Skrodzka, prof. UAM

Dr hab. inż. Tadeusz Wszolek, prof. AGH

Dr hab. inż. Wiesław Wszolek, prof. AGH

Materiały zawarte w niniejszej monografii zostały zrecenzowane przez Członków Komitetu naukowego konferencji Inżynieria Akustyczna i Biomedyczna 2018.

Skład i redakcja techniczna: Katarzyna Suder-Dębska (AGH)

ISBN: 978-83-61402-39-8

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Spis treści

I. Akustyka budowli

- Miroslaw Meissner*
Accuracy assessment of sound burst reproduction in small rectangular rooms 7
- Tytus Strychniewicz, Tadeusz Wszolek*
Analiza budżetu niepewności w pomiarach terenowych izolacyjności przegród budowlanych od dźwięków powietrznych 21

II. Akustyka i muzyka

- Andrzej Mądro*
Muzyka metalowa po cyfrowej rewolucji – od inżynierii akustycznej do techno–estetyki 31
- Marek Pluta*
Korpus automatycznego syntezy frazy dla instrumentów dętych orkiestry symfonicznej 41
- Marcin Strzelecki*
O możliwościach zastosowania technik wyszukiwania informacji w stylometrycznej analizie muzyki 53

III. Inżynieria biomedyczna

- Olga Doubrovina, Ryszard Tymkiewicz, Hanna Piotrkowska–Wróblewska, Barbara Gambin*
Linking of structural parameters to properties of ultrasound backscattered signals by the threads phantoms study 67
- Jarosław Drozd, Barbara Gambin*
Solidification of dental material Clearfil F2 described by composite rheological model 81

*Barbara Gambin, Eleonora Kruglenko, Jerzy Litniewski,
Ryszard Tymkiewicz*
Dynamic elasticity, acoustical impedance and attenuation of special
tissue-like phantoms 89

Ilona Korczak, Barbara Gambin, Eleonora Kruglenko
Stabilizacja temperatury organu podczas zabiegu transplantacji 97

Eleonora Kruglenko, Ilona Korczak, Barbara Gambin
Efektywność hipertermii ultradźwiękowej w agarowych wzorcach
tkanki miękkiej domieszkowanych różnymi składnikami 105

IV. Metody fizyczne w biomedycynie

Henryka Czyż, Tadeusz Jasiński, Andrzej Włoch
Physical basis of MR–HIFU ultrasonic method for myomas treatment . . 117

V. Metody numeryczne i narzędzia programowe w akustyce

Dawid Romik, Ireneusz Czajka, Katarzyna Suder–Dębska
Badania numeryczne wpływu parametrów konstrukcyjnych
wentylatora promieniowego na generowany hałas 133

VI. Wibroakustyka w technice i środowisku

Janusz Kompała
Drogowe ekrany akustyczne – wybawienie czy przekleństwo 153

Jakub Piechowicz
Badania izolacyjności przemysłowych ekranów akustycznych
w warunkach pola pogłosowego 163

Bożena Smagowska, Dariusz Pleban, Emil Kozłowski, Witold Mikulski
Narażenie na hałas w zakładach opakowań metalowych 179

Krzysztof Szemela, Wojciech Żyłka, Wojciech Rdzanek
Promieniowanie dźwięku tłoka kołowego umieszczonego na dnie
otwartej prostokątnej wnęki – wstępne wyniki doświadczalne 193

Część I

Akustyka budowli

Mirostaw MEISSNER

ACCURACY ASSESSMENT OF SOUND BURST REPRODUCTION IN SMALL RECTANGULAR ROOMS

*Polish Academy of Sciences,
Institute of Fundamental Technological Research,
Pawińskiego 5B, 02-106 Warsaw
e-mail: mmeissn@ippt.pan.pl*

Abstract: In the low-frequency range, a sound reproduction in small rectangular rooms is strongly influenced by acoustic modes of a room. While the spectral impact of acoustic modes on a room response is well recognized, there is little information on how modes alter the temporal response of a room. In the work this issue has been examined theoretically using the convolution theorem and a modal description of the room impulse response. To determine the effect of a sound frequency on the transient response of a room, the usual tone burst was used as an acoustic excitation. Consequently, the tone burst was modelled by the n -cycle continuous sine wave multiplied by the rectangular window. To evaluate an accuracy of the tone burst reproduction, a new energy parameter has been introduced. The basis for determining this parameter is the difference between the amplitude of a source signal and the amplitude of a sound pressure at different listening positions. The pressure amplitude was predicted via the method employing the Hilbert transform. Calculation results of this parameter were compared to the spatial distribution of a sound pressure at steady-state to determine a connection between the transient and steady-state room responses.

INTRODUCTION

In room acoustics, enclosures that have volumes in the limit from a few cubic meters to a few hundred cubic meters are classified as small rooms [1]. In the acoustical sense, one has to deal with rooms having sizes of the same order of magnitude with the wavelength at the frequencies in question or rooms in which the early reflections by walls, ceiling, and room objects arrive within milliseconds of the direct sound. Because of small sizes of a room, an acoustic response at low frequencies is predominated by a wave behavior [2], thus, well defined position-dependent maxima and minima of a room response are observed in low-frequency range [3]. To improve the quality of sound reproduction in small rooms, in last years the room response equalization has been intensively examined in theory and practice [4]. These studies have resulted in a number of digital signal processing techniques, thanks to which a sound equalization inside rooms became more effective, and many of these techniques were dedicated to a rectangular room shape due to possibilities for practical applications [5]– [7].

In rectangular rooms, there are acoustic drawbacks typical for rooms with parallel walls like the slap echo, the flutter echo and the unwanted sound coloration due to strong early sound reflections [8]. Another acoustic defect stems from a high irregularity of a frequency response of a room resulting from an large amplification of a sound pressure at frequencies of room modes. While these unwanted effects are well understood and can be prevented by an appropriate location of a wall absorbing material [9] and the optimization of room dimen-

sion ratios [10]– [12], there is still little information on how room modes alter the temporal response of a room and thereby, how they change a reproduction of a transient sound inside a room space. In the paper this problem is studied theoretically by applying the convolution theorem and a modal representation of the room impulse response. To determine the impact of a sound frequency on the transient response of a room, the tone burst modelled by the n -cycle continuous sine wave multiplied by the rectangular window is used to excite room modes. To evaluate an accuracy of the tone burst reproduction, a new energy parameter has been proposed and the basis for computing this parameter is the difference between the amplitude of a source signal and the amplitude of a sound pressure determined by the discrete Hilbert transform. Calculation results of this parameter are compared to the spatial steady-state distribution of a sound pressure to find a relationship between the transient and steady-state room responses.

TRANSIENT RESPONSE OF A ROOM

The best way to determine the transient response of a room is to use the room impulse response (RIR) in theoretical modeling. The RIR is very useful in room acoustics because a knowledge of the RIR function $h(\mathbf{r}', \mathbf{r}, t)$ describing the pressure response at the receiving point $\mathbf{r} = (x, y, z)$ to the time impulse at the point $\mathbf{r}' = (x', y', z')$, enables to predict the room response for arbitrary sound source. When the volume source term is described by the function $q(\mathbf{r}', t)$, the pressure response to this source excitation can be found from the following equation [13]

$$p(\mathbf{r}, t) = \int_V q(\mathbf{r}', t) * h(\mathbf{r}', \mathbf{r}, t) d^3\mathbf{r}' = \int_V \int_{-\infty}^t q(\mathbf{r}', \tau) h(\mathbf{r}', \mathbf{r}, t - \tau) d\tau d^3\mathbf{r}', \quad (1)$$

where V is the room volume, the symbol $*$ denotes a convolution operation and $d^3\mathbf{r}' = dx' dy' dz'$ is the volume element. In the forthcoming analysis the point source will be considered, thus, the volume source term in Eq. (1) takes the form

$$q(\mathbf{r}', \tau) = Q\delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)s(\tau), \quad (2)$$

where $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ defines the source position, $s(\tau)$ is the non-dimensional function describing a temporal behavior of the source and Q is given by $Q = \sqrt{8\pi\rho cW}$ [14], where ρ is the air density, c is the sound speed and W is the source power. Therefore, after inserting Eq. (2) into Eq. (1) one can obtain

$$p(t) = Q \int_{-\infty}^t s(\tau) h(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

A method for finding the RIR function $h(\mathbf{r}', \mathbf{r}, t)$ was described in detail in the work [15] and the obtained result is expressed by

$$h(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, t) = c^2 \sum_{m=1}^M \frac{e^{-r_mt} \sin(\Omega_m t) \Phi_m(\mathbf{r}_0) \Phi_m(\mathbf{r})}{\Omega_m}, \quad (4)$$

where M is the total number of modes included in the series expansion (theoretically, M approaches infinity), Ω_m are natural frequencies for rooms with sound absorbing walls

$$\Omega_m = \sqrt{\omega_m^2 - r_m^2}, \quad (5)$$

ω_m are the natural frequencies for rooms with perfectly rigid walls and r_m are the modal damping factors

$$r_m = \frac{c}{2} \int_S \xi(\mathbf{r}_s) \Phi_m^2(\mathbf{r}_s) ds, \quad (6)$$

where S is the surface of room walls, $\xi(\mathbf{r}_s)$ is the specific wall conductance and \mathbf{r}_s is a position coordinate on the wall surface. It is assumed that the value of $\xi(\mathbf{r}_s)$ is small because typical materials covering room walls are characterized by a small sound absorption at low frequencies [?]. The functions $\Phi_m(\mathbf{r})$ occurring in Eq. (4) represent the mode shape functions which satisfy the orthonormal property in the room volume. For small sound damping on room walls, the functions can be approximated by the products of cosine functions in three dimensions

$$\Phi_m(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{n_x} \varepsilon_{n_y} \varepsilon_{n_z}}{V}} \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right), \quad (7)$$

where the indices n_x, n_y, n_z are non-negative integers and they are not simultaneously equal to zero, $\varepsilon_{n_s} = 1$ for $n_s = 0$, $\varepsilon_{n_s} = 2$ for $n_s > 0$ and $s = x, y, z$. The natural frequencies ω_m corresponding to these functions are the following

$$\omega_m = \pi c \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}. \quad (8)$$

The most straightforward way to determine the transient response of a room is the application of a tone burst as a sound excitation. In a theoretical analysis a usual form of the tone burst is assumed, i.e. the burst is created by multiplying the sinusoidal signal of the frequency ω with a rectangular window whose the length T corresponds to a specified number of full sine-wave cycles. It is postulated that ω belongs to a low-frequency range and a duration of the burst is long enough to distinguish transients during a sound build-up and a sound decay. To simplify mathematical considerations, the sine function $\sin(\omega t)$ in the tone burst will be replaced by its complex representation $\exp(j\omega t)$. In this case, the source function $s(t)$ describing the tone burst beginning at the time $t = 0$ can be written as

$$s(t) = \begin{cases} e^{j\omega t}, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases} \quad (9)$$

where $T = 2\pi n/\omega$ and n is the positive integer. A transient response to the sine burst for the time t from the interval $0 \leq t \leq T$ can be found after inserting Eqs. (4) and (9) into Eq. (3), integrating over the time τ from zero to t and taking the imaginary part of the obtained result. It gives the formula

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=1}^M \text{Im} \left\{ (\alpha_m + j\beta_m) \Phi_m(\mathbf{r}) \left[e^{j\omega t} - F_m(t) \right] \right\}, \quad (10)$$

where $\text{Im}(\cdot)$ denotes the imaginary part of a complex number, the parameters α_m and β_m are expressed as (see the Appendix)

$$\alpha_m = \frac{Qc^2(\omega_m^2 - \omega^2) \Phi_m(\mathbf{r}_0)}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + 4r_m^2\omega^2}, \quad \beta_m = -\frac{2Qc^2r_m\omega \Phi_m(\mathbf{r}_0)}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + 4r_m^2\omega^2}, \quad (11)$$

and the function $F_m(t)$ has the following form

$$F_m(t) = e^{-r_mt} \left[\cos(\Omega_mt) + \frac{(r_m + j\omega) \sin(\Omega_mt)}{\Omega_m} \right]. \quad (12)$$

Equation (10) describes the process of a sound build-up in a room because the component of a series, which depends on the tone frequency, represents a steady-state response whereas the component, which is a superposition of modal vibrations decaying exponentially with the time, constitutes a transient term. If the modal damping factors r_m are sufficiently large and the time t is long enough, a steady state inside a room will be reached. A transient response of a room for the time t greater than the burst duration can be obtained by calculating the integral in Eq. (3) from zero to T . This leads to the following equation

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=1}^M \text{Im} \{ (\alpha_m + j\beta_m) \Phi_m(\mathbf{r}) [F_m(t-T) - F_m(t)] \} \quad (13)$$

showing that when the tone burst is finished, the room response consist of two decaying transients arising at moments of turning on and turning off of the sinusoidal signal. Of course, when the tone burst is long enough, the effect of the first transient on the room response will be small, so it can be omitted.

QUANTIFICATION OF TONE BURST REPRODUCTION ERROR

An aim of the forthcoming analysis is to quantify the impact of excited room modes on a reproduction of a tone burst. Consequently, the time span of interest is from zero to the burst duration T , thus, the transient sound occurring just after starting the tone burst should only be taken into account in the analysis. In this time span the total sound pressure is described by Eq. (10) and this equation can be transformed into the form

$$p(\mathbf{r}, t) = P(\mathbf{r}) \sin[\omega t + \phi(\mathbf{r})] + \sum_{m=1}^M P_m(\mathbf{r}) e^{-r_mt} \sin(\Omega_mt + \phi_m) \quad (14)$$

after applying Eqs. (5), (11) and (12) to Eq. (10). In the above equation $P(\mathbf{r})$ is the pressure amplitude in a steady-state sound field (see Appendix)

$$P(\mathbf{r}) = \left\{ \left[\sum \alpha_m \Phi_m(\mathbf{r}) \right]^2 + \left[\sum \beta_m \Phi_m(\mathbf{r}) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

the parameter $\phi(\mathbf{r})$ represents the phase shift for steady-state pressure vibrations

$$\phi(\mathbf{r}) = \arctan \left[\frac{\sum \beta_m \Phi_m(\mathbf{r})}{\sum \alpha_m \Phi_m(\mathbf{r})} \right], \quad (16)$$

the quantities $P_m(\mathbf{r})$ are the pressure amplitudes for decaying modal vibrations

$$P_m(\mathbf{r}) = \frac{Qc^2\omega\Phi_m(\mathbf{r})\Phi_m(\mathbf{r}_0)}{\Omega_m\sqrt{[(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + 4r_m^2\omega^2]}}, \quad (17)$$

the formula for the phases ϕ_m is determined by

$$\phi_m = \arctan\left(\frac{2r_m\Omega_m}{\omega^2 - \omega_m^2 + 2r_m^2}\right) \quad (18)$$

and the symbol Σ denotes a sum over m from unity to M . From an energetic point of view an indicator, which is adequate to quantify a tone burst reproduction quality, is the deviation of the amplitude of the pressure $p(\mathbf{r}, t)$ from the tone burst amplitude $P(\mathbf{r})$. As shown by Eq. (14), this deviation depends on the time, so the energy parameter describing the tone burst reproduction error is defined by

$$E(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{P_a(\mathbf{r}, t) - P(\mathbf{r})}{P(\mathbf{r})} \right]^2 dt}, \quad (19)$$

where $P_a(\mathbf{r}, t)$ is the time dependent amplitude of the pressure $p(\mathbf{r}, t)$. Equation (19) indicates that the parameter $E(\mathbf{r})$ is in fact a root mean square value of the relative amplitude deviation in the time interval $0 \leq t \leq T$ and it is equal to zero when a reproduced sound is not influenced by room acoustics. In order to determine the amplitude $P_a(\mathbf{r}, t)$, the method employing the Hilbert transform was used. In the continuous-time domain, the Hilbert transform H of a real-valued signal $s(t)$ is defined as [17]

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau, \quad (20)$$

where the integral is considered as a Cauchy principal value because of the possible singularity at $\tau = t$ or $\tau = 0$. The signal $s(t)$ and its Hilbert transform $H[s(t)]$ are related to each other in such a way that they together create the so-called analytic signal $s_a(t)$ defined as

$$s_a(t) = s(t) + jH[s(t)] = A(t)e^{j\psi(t)}, \quad (21)$$

where $A(t) = \{s^2(t) + H^2[s(t)]\}^{1/2}$ and $\psi(t) = \arctan\{H[s(t)]/s(t)\}$ are the amplitude and phase of the analytic signal. In the considered case, the pressure signal obtained via a numerical procedure is of finite length and digitally sampled. From a mathematical point of view, discrete time signals of finite length are represented as sequences of numbers, in which the n th number in the sequence is denoted by $s[n]$. For convenience, it is assumed that $n = 0, 1, \dots, N-1$. In the discrete-time domain, the Hilbert transform H is replaced by the discrete Hilbert transform H_d which for non-periodic signals is defined as [18]

$$H_d\{x[n]\} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \sum_{m=\text{odd}}^{N-1} \frac{s[m]}{n-m}, & n \text{ even,} \\ \frac{2}{\pi} \sum_{m=\text{even}}^{N-1} \frac{s[m]}{n-m}, & n \text{ odd.} \end{cases} \quad (22)$$

The analytic discrete time signal $s_a[n]$ corresponding to $s[n]$ is then given by

$$s_a[n] = s[n] + j H_d\{s[n]\} = A[n]e^{j\psi[n]}, \quad (23)$$

where the envelope $A[n]$ and the phase $\psi[n]$ are determined in the same way as $A(t)$ and $\psi(t)$ in the continuous time case.

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATIONS

A computer program was developed for this study to simulate the sound pressure within the time interval greater than the burst duration [Eq. (13)] and to evaluate an accuracy of a reproduction of a transient sound by means of the tone burst reproduction error E [Eq. (19)]. In numerical simulations, a small rectangular room with the following dimensions: $L_x = 8$ m, $L_y = 5$ m, $L_z = 3$ m, was considered. It was assumed that the sound absorbing material is uniformly distributed on room walls and damping properties of this material is characterized by the random-incident absorption coefficient α . The absorption coefficient α is related to the wall conductance ξ by the expression [14]

$$\alpha = 8\xi \left[1 + \frac{\xi}{1+\xi} - 2\xi \ln \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \right], \quad (24)$$

thus, when α was selected, the value of ξ was determined by a numerical solution of Eq. (24).

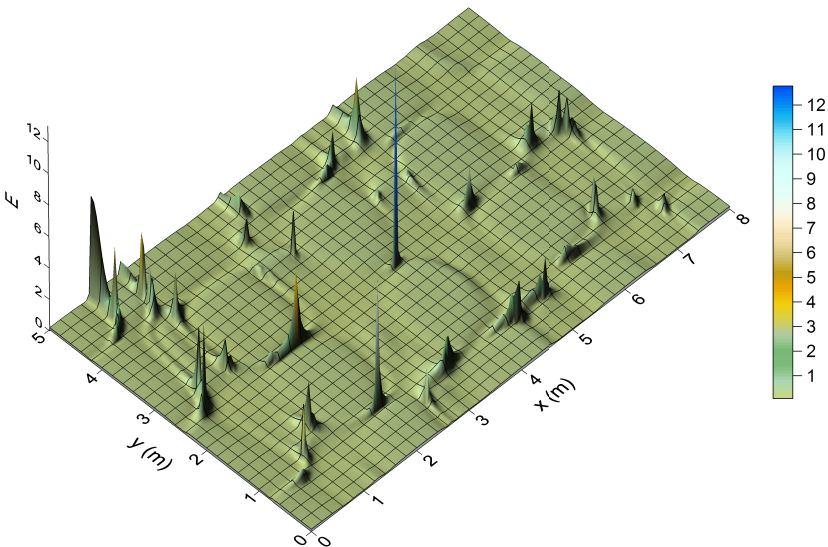


Figure 1. A surface distribution of the tone burst reproduction error E on the listening plane $z = 1.2$ m for the absorption coefficient α of 0.05

The number M of modes in the series expansion (4) is the important parameter of a numerical algorithm because it strongly affects the calculation time. For rectangular rooms the number of modes up to the frequency f_u can be determined from the formula [16]

$$M = \text{Int} \left[\frac{4\pi V}{3} \left(\frac{f_u}{c} \right)^3 + \frac{\pi S}{4} \left(\frac{f_u}{c} \right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f_u}{c} \right) \right], \quad (25)$$

where function $\text{Int}(\cdot)$ rounds the argument to the closest integer, $V = L_x L_y L_z$ and $S = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$ are the room volume and surface of room walls, and $L = 4(L_x + L_y + L_z)$ is the sum of lengths of the room's edges. Since low-frequency range was considered, in a numerical algorithm the condition was imposed that the frequency f_u should not exceed 500 Hz. Thus, after inserting this value of f_u into Eq. (25) one can obtain the number M of 1832 which does not entail intensive computational effort.

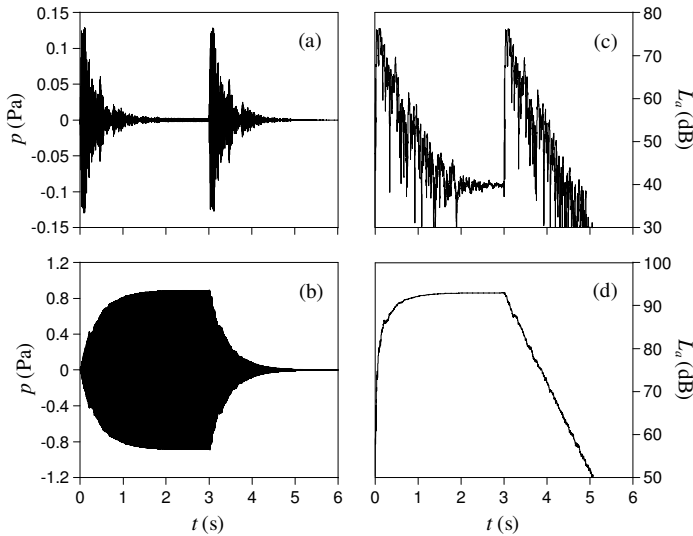


Figure 2. Time dependencies of the sound pressure p – (a), (b) and the level L_α – (c), (d) for the listening position (x, y, z) , where $x = 4.1$ m, $z = 1.2$ m and: (a), (c) $y = 2.5$ m and (b), (d) $y = 3.5$ m. The absorption coefficient α of 0.05

In computer simulations, the point source with the power W of 10^{-4} W located at the position: $x_0 = 2$ m, $y_0 = 3$ m, $z_0 = 1$ m was used to excite acoustic modes of a room. The aim of numerical tests was to determine a transient response of a room and a distribution of the error E for the burst duration T of 3 seconds and the tone frequency $f = \omega/2\pi$ equal to 200 Hz. Such value of T was chosen to provide that a transient sound occurring at the moment of a burst start disappears over the burst duration. A distribution of E in a form of 3D surface calculated on the listening plane $z = 1.2$ m for the absorption coefficient α of 0.05 is shown in Fig. 1. The tone burst reproduction error, as seen in this figure, is much smaller than unity

on a predominant part of the listening plane. However, a surprising thing is the presence of strong peaks of E at some points on the listening plane. Values of E in these peaks are clearly larger than unity and in the extreme case, which is noted at the point: $x = 4.1$ m, $y = 2.5$ m, the error E reaches the value of 12.8. To explain this phenomenon, the transient behavior of a room response was examined in this point by a visual inspection of temporal changes in the sound pressure p and the level L_a of the pressure amplitude P_a

$$L_a = 20 \log(P_a/p_0), \quad (26)$$

where $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ is the reference sound pressure, over a time interval larger than the burst duration T .

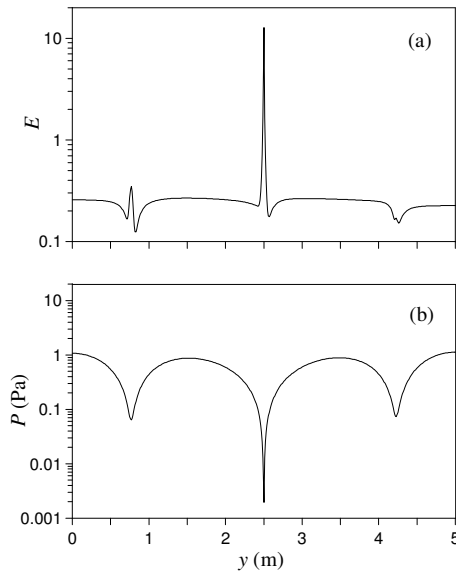


Figure 3. (a) The tone burst reproduction error E and (b) the steady-state pressure amplitude P versus the y -coordinate for $x = 4.1$ m and $z = 1.2$ m. The absorption coefficient α of 0.05

Graphs in Figs. 2(a) and 2(c) illustrate time dependencies of p and L_a simulated at the listening position: $x = 4.1$ m, $y = 2.5$ m, during a 6-second interval. In Figs. 2(b) and 2(d) the same time dependencies at the neighboring listening point: $x = 4.1$ m, $y = 3.5$ m are depicted for comparison purposes. The plot in Fig. 2(a) proves that a high inaccuracy of the tone burst reproduction is caused by a presence of transient sound with an amplitude much bigger than the burst amplitude. Since, as shown by Eq. (14), the burst amplitude is equal to the pressure amplitude P at steady-state, a large burst reproduction error is a result of a very small value of P . This fact is confirmed by charts in Fig. 3 showing changes in the error E and the amplitude P versus the y -coordinate for $x = 4.1$ m and $z = 1.2$ m, because the peak in E corresponds exactly to the minimum value of P . On the contrary, for the listening position: $x = 4.1$ m, $y = 3.5$ m and $z = 1.2$ m, the steady-state pressure amplitude P is large (Fig. 3(b)).

In this case a reproduced sound is characterized by the long exponential build-up and decay as indicated by drawings in Figs. 2(c) and 2(d). This effect is characteristic for room systems with small sound damping and it occurs when the source frequency corresponds exactly to one of resonance frequencies of a room and the observation position is close to the pressure antinode.

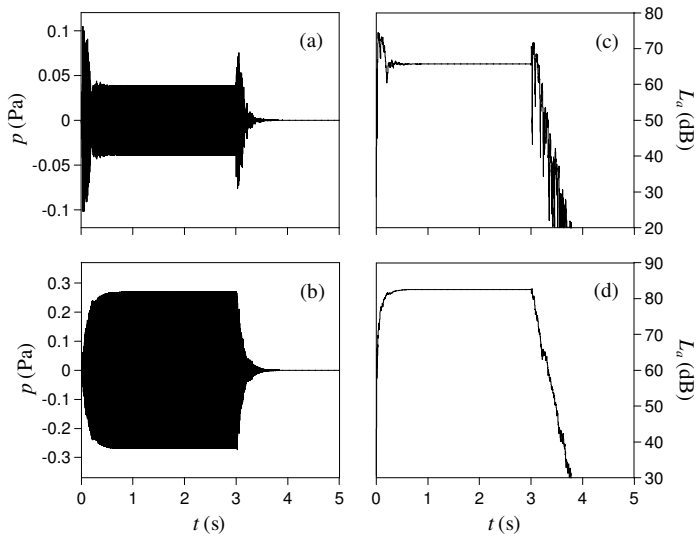


Figure 4. Time dependencies of the sound pressure p (a), (b) and the level L_a (c), (d) for the listening position (x, y, z) , where $x = 4.1$ m, $z = 1.2$ m and: (a), (c) $y = 2.5$ m and (b), (d) $y = 3.5$ m. The absorption coefficient α of 0.15

In terms of acoustic properties, the considered room can be classified as a hard-walled room because an application of a material with the absorption coefficient of 0.05 on room walls does not provide proper reverberation parameters for listening to speech or music. Using a procedure described in the work [19] it is easily to find that the modal reverberation time for this room is ranging from 2.3 to 3.9 seconds which means a poor listening quality. A method commonly employed to improve reverberation properties of a hard-walled room consists in using a wall material with a higher sound absorption. It would therefore be reasonable to check the extent to which such an acoustical treatment of a room will improve a reproduction of the tone burst. The answer to this question can be found in Figs. 4 and 5 depicting temporal changes in the sound pressure p and the level L_a for the same listening positions as before and the absorption coefficient α of a wall material equal to 0.15 and 0.3. The graphs in these figures indicate clearly that an increase in α is accompanied by substantial changes in a distribution of the steady-state pressure amplitude P_a . In the first listening position, the increase in α causes a growth in P_a , but in the second position is the opposite, i.e. when α is growing a diminution of P_a is noted.

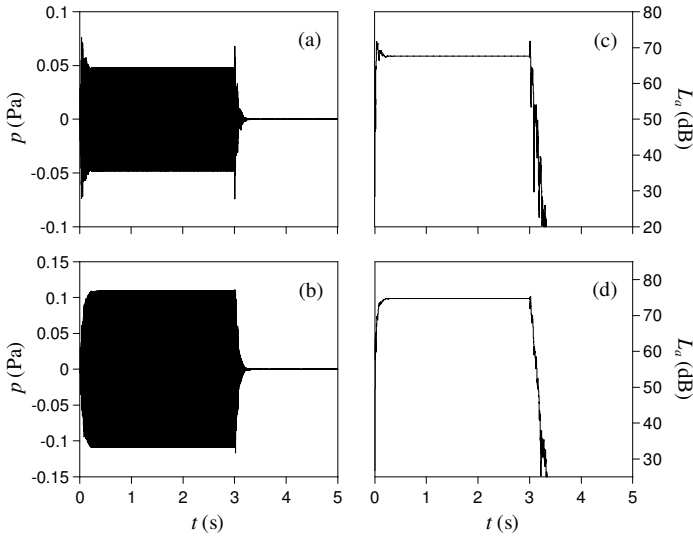


Figure 5. Time dependencies of the sound pressure p (a), (b) and the level L_a (c), (d) for the listening position (x, y, z) , where $x = 4.1$ m, $z = 1.2$ m and: (a), (c) $y = 2.5$ m and (b), (d) $x = 3.5$ m. The absorption coefficient α of 0.3

Additionally, an increase in α leads to a substantial decrease in the modal reverberation time, therefore, a considerable shortening of a duration of a transient sound with growing α is observed. These effects cause that the tone burst reproduction error E decrease continuously with increasing α (Fig. 6). This drop is especially large for the first listening position because when the absorption coefficient α varies from 0.05 to 0.3, the value of E decreases from 12.8 up to 0.083 (Fig. 6(a)).

SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this paper, a new method has been presented for assessing an accuracy of a sound burst reproduction in small rectangular rooms. A theoretical modelling was based on a low-frequency description of the room impulse response, which in combination with the convolution theorem, allowed a prediction of a room response to a sound burst excitation. This response is frequency dependent and accounts for the source and listening positions, therefore, in a theoretical study a point source emitting a tone burst was assumed and the room response was examined in a listening area situated at a constant distance from a floor. The tone burst was modelled by the n -cycle sine wave multiplied by the rectangular window to ensure continuity of the source signal. Using the transient response of a room, a new energy parameter quantifying the error of a tone burst reproduction has been introduced. The basis for computing this parameter is the difference between the amplitude of a source signal and the amplitude

of a sound pressure determined via the method employing the Hilbert transform. Theoretical considerations have been accompanied with numerical simulations carried out for a rectangular room with uniform distribution of a sound absorption on room walls.

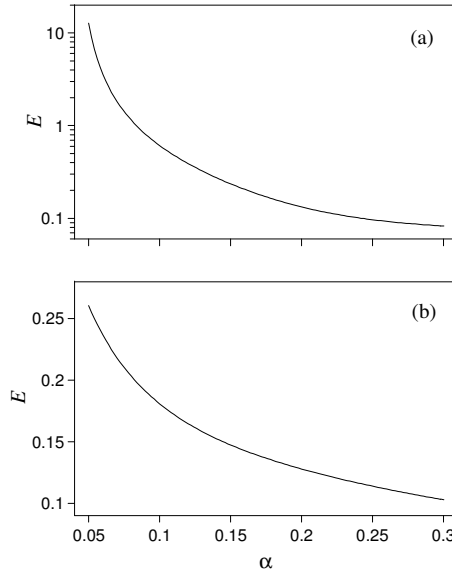


Figure 6. The tone burst reproduction error E versus the absorption coefficient α for the listening position (x, y, z) , where $x = 4.1$ m, $z = 1.2$ m and: (a) $y = 2.5$ m and (b) $y = 3.5$ m

Calculation results have demonstrated that a high inaccuracy of the tone burst reproduction for a hard-walled room is caused by a presence of transient sound with an amplitude much bigger than the burst amplitude. Since the burst amplitude is equal to the pressure amplitude for a continuous pure-tone excitation, a burst reproduction error is large at such listening positions where there are strong dips in a steady-state distribution of a sound pressure. As shown by simulation data, the effective method for reducing the tone burst reproduction error consisted in using a wall material with a higher sound absorption. This is due to the fact that in this case the energy in room resonances are physically attenuated, reducing the point-to-point variations in a sound pressure at steady-state.

Acknowledgement

This work was completed as part of the project titled “Steady-state and transient energy sound field parameters for objective evaluation of acoustics of enclosed spaces: theoretical modeling and computer simulations”. It was funded by the OPUS research grant no. 2016/21/B/ST8/02427 supported by the National Science Centre, Poland.

Appendix – STEADY-STATE ROOM RESPONSE

In low-frequency range, the method, which is most appropriate for determining the sound field inside small rooms, is based on the modal approach. According to this method, the pressure room response can be described as a superposition of individual responses of acoustic modes generated inside a room by a sound source, i.e.,

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=1}^M p_m(t) \Phi_m(\mathbf{r}), \quad (\text{A1})$$

where M is the number of modes included in the series expansion, \mathbf{r} defines a position of the receiving point, the function $p_m(t)$ determines a temporal behavior of the sound pressure for the m -th mode and $\Phi_m(\mathbf{r})$ represents the mode shape function. A method for finding the function $p_m(t)$ for steady-state conditions relies on a solution of the wave equation for a pure-tone sound source located in the point \mathbf{r}_0 . Using the procedure presented in the work [20], it can be shown that in this case the function $p_m(t)$ is a solution of the following differential equation

$$\frac{\partial^2 p_m}{\partial t^2} + 2r_m \frac{\partial p_m}{\partial t} + \omega_m^2 p_m = Qc^2 \Phi_m(\mathbf{r}_0) e^{j\omega t}, \quad (\text{A2})$$

where r_m is the modal damping factor, ω_m is the natural frequency, c is the sound speed, ω is the source frequency and $Q = \sqrt{8\pi\rho cW}$, where ρ is the air density and W is the source power. Equation (A2) can be easily solved assuming a harmonic time dependence of $p_m(t)$. Thus, the formula for the function $p_m(t)$ is as follows

$$p_m(t) = (\alpha_m + j\beta_m) e^{j\omega t}, \quad (\text{A3})$$

where the parameters α_m and β_m are given by

$$\alpha_m = \frac{Qc^2(\omega_m^2 - \omega^2) \Phi_m(\mathbf{r}_0)}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + 4r_m^2 \omega^2}, \quad \beta_m = -\frac{2Qc^2 r_m \omega \Phi_m(\mathbf{r}_0)}{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 + 4r_m^2 \omega^2}. \quad (\text{A4})$$

The pressure amplitude $P_c(\mathbf{r})$ at steady-state can be found after inserting Eq. (A3) into Eq. (A1) and omitting the time dependence $\exp(j\omega t)$. The result is

$$P_c(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M (\alpha_m + j\beta_m) \Phi_m(\mathbf{r}). \quad (\text{A5})$$

Since $P_c(\mathbf{r})$ is complex, a parameter suitable for the evaluation of the sound pressure variance is the pressure amplitude $P(\mathbf{r})$ determined by the absolute value of $P_c(\mathbf{r})$, i.e.

$$P(\mathbf{r}) = \sqrt{P_c(\mathbf{r})P_c^*(\mathbf{r})}, \quad (\text{A6})$$

where an asterisk indicates the complex conjugate. Thus, after inserting Eq. (A5) into Eq. (A6) one finds the following formula for $P(\mathbf{r})$

$$P(\mathbf{r}) = \left\{ \left[\sum \alpha_m \Phi_m(\mathbf{r}) \right]^2 + \left[\sum \beta_m \Phi_m(\mathbf{r}) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A7})$$

where the symbol Σ denotes a sum over m from unity to M . As it results from Eqs. (A4) and (A7), the steady-state pressure amplitude is not only a function of the receiver position \mathbf{r} , but also depends on the source position \mathbf{r}_0 and the source frequency ω through the parameters α_m and β_m . Thus, for a constant \mathbf{r}_0 and a given source frequency, Eq. (A7) enables to calculate a steady-state distribution of the sound pressure amplitude inside a room space.

BIBLIOGRAPHY

- [1] M. Kleiner, J. Tichy, *Acoustics of small rooms*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2014.
- [2] D. Jones, *Small room acoustics*, [in:] *Handbook for sound engineers*, 5th. ed., Focal Press, Burlington, 2015, 117–135.
- [3] M. Meissner, *Wave-based method for simulating small room acoustics*, [in:] *Advances in acoustics*, Warsaw Division of Polish Acoustical Society, Warsaw, 2016, 425–436.
- [4] S. Cecchi, A. Carini, S. Spors, *Room response equalization – A review*, Applied Sciences, 2018, 8(1), 16.
- [5] A. Santillán, C. Pedersen, M. Lydolf, *Experimental implementation of a low-frequency global sound equalization method based on free field propagation*, Applied Acoustics, 2007, 68(10), 1063–1085.
- [6] B. Bank, *Full room equalization at low frequencies with asymmetric loudspeaker arrangements*, Proceedings of 132nd AES Convention, Preprint No. 8593, Budapest, Hungary, 2012.
- [7] A. Hill, M. Hawskford, P. Newell, *Enhanced wide-area low-frequency sound reproduction in cinemas: Effective and practical alternatives to current calibration strategies*, Journal of the Audio Engineering Society, 2016, 64(5), 280–298.
- [8] C. Sevastiadis, G. Kalliris, G. Papanikolaou, *Investigation of low-frequency sound colouration treatments in small rooms by means of finite element analysis*, International Journal of Acoustics and Vibration, 2010, 15(3), 128–139.
- [9] M. Asselineau, *Building acoustics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2015.
- [10] T. Cox, P. D’Antonio, M. Avis, *Room sizing and optimization at low frequencies*, Journal of Audio Engineering Society, 2004, 52(6), 640–651.
- [11] J. Sarris, *A new method for the determination of acoustically good room dimension ratios*, Proceedings of 136th AES Convention, Preprint No. 9047, Berlin, Germany, 2014.
- [12] M. Meissner, T. Zieliński, *Shape optimization of rectangular rooms for improving sound quality at low frequencies*, [in:] *Advances in acoustics*, Silesian Division of Polish Acoustical Society, Gliwice, 2017, 461–472.
- [13] S. Damelin, W. Miller, *The mathematics of signal processing*, Cambridge University Press, New York, 2012.
- [14] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sander, *Fundamentals of acoustics*, 4th. ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [15] M. Meissner, *Prediction of reverberant properties of enclosures via a method employing a modal representation of the room impulse response*, Archives of Acoustics, 2016, 41(1), 27–41.
- [16] H. Kuttruff, *Room acoustics*, 5th ed., Spon Press, New York, 2009.
- [17] S. Hahn, *Hilbert transforms in signal processing*, Artech House, Boston, 1996.
- [18] S. Kak, *The discrete Hilbert transform*, Proceedings of the IEEE, 1970, 58(4), 585–586.
- [19] M. Meissner, *Acoustics of small rectangular rooms: Analytical and numerical determination of reverberation parameters*, Applied Acoustics, 2017, 120, 111–119.
- [20] M. Meissner, *Acoustic energy density distribution and sound intensity vector field inside coupled spaces*, Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(1), 228–238.

Tytus STRYCNIEWICZ, Tadeusz WSZOŁEK

ANALIZA BUDŻETU NIEPEWNOŚCI W POMIARACH TERENOWYCH IZOLACYJNOŚCI PRZEGRÓD BUDOWLANYCH OD DŹWIĘKÓW POWIETRZNYCH

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
e-mail:*

Streszczenie: Izolacyjność akustyczna przegród budowlanych od dźwięków powietrznych, należy do kluczowych parametrów ogólnej jakości obiektu oraz oceny klimatu akustycznego wewnątrz pomieszczeń. Jednoliczbowy wskaźnik izolacyjności oraz widmowe wskaźniki adaptacyjne, zależą od szeregu czynników, które mają wpływ na jego wynik. Należą do nich między innymi rozkłady widmowe ciśnienia akustycznego wewnątrz pomieszczenia nadawczego i odbiorczego, chłonność akustyczna pomieszczenia odbiorczego oraz powierzchnia badanej przegrody. W przypadku przegrody zewnętrznej ważny jest rodzaj hałasu przenikającego do wnętrza. Głównym celem referatu jest opracowanie oraz analiza poszerzonego budżetu niepewności pomiarowej wyznaczania izolacyjności akustycznej. Na potrzeby pracy wykonano pomiary izolacyjności przegród budowlanych od dźwięków powietrznych zgodnie z normą PN-EN ISO 16283-1:2014-05, w wybranych budynkach mieszkalnych na terenie miasta Krakowa. Sporządzono poszerzony budżet niepewności, wskazując czynniki mające największy wpływ na wynik końcowy niepewności pomiarowej wraz z możliwościami ich poprawy.

WSTĘP

Jednoliczbowy wskaźnik izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych służy do oceny przegród budowlanych. Wyznaczenie tego parametru, zarówno w pomiarach terenowych, jak i laboratoryjnych jest niekiedy problematyczne ze względu na zmienne uwarunkowania badawcze, zwłaszcza w warunkach terenowych oraz konstrukcję przegrody z punktu widzenia jej montażu w oknie pomiarowym w warunkach laboratoryjnych, w kontekście spełnienia wymagań stawianych w normach ISO 140 [1], ISO 16283 [2] oraz ISO 717 [3]. Jednak najczęściej niejednoznaczności występuje w przypadku pomiarów terenowych. W takim przypadku ważna jest znajomość czynników wpływających na dokładność wyniku pomiarowego. Jakość wyników pomiarów można określić za pomocą poszerzonej analizy niepewności pomiarowej, ujmującej niepewności tych czynników. Problematykę niepewności pomiarów metodyk zawartych w normie ISO 140-4, podnoszono m.in. w pracach [4]– [6] i zwrócono uwagę na niektóre źródła niepewności, a zwłaszcza liczbę punktów i powtórzeń pomiarów, mających największy wpływ na niepewność pomiaru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych. Dodatkowe źródła niepewności to niepewności pomiaru czasu pogłosu oraz parametrów geometrycznych pomieszczeń i badanych przegród. Ogólne zasady dotyczące niepewności pomiarowej, zawarte są w przewodniku GUM [7] i to na nich oparto się przy sporządzaniu budżetu niepewności w ramach niniejszej pracy. W artykule przeprowa-

dzono analizę budżetu niepewności wyznaczania jednolicebnych wskaźników izolacyjności przegrod od dźwięków powietrznych oraz izolacyjności w pasmach 1/3 oktaowych.

METODYKA POMIAROWA ORAZ KONSTRUKCJA BUDŻETU NIEPEWNOŚCI

Terenowy pomiar izolacyjności od dźwięków powietrznych

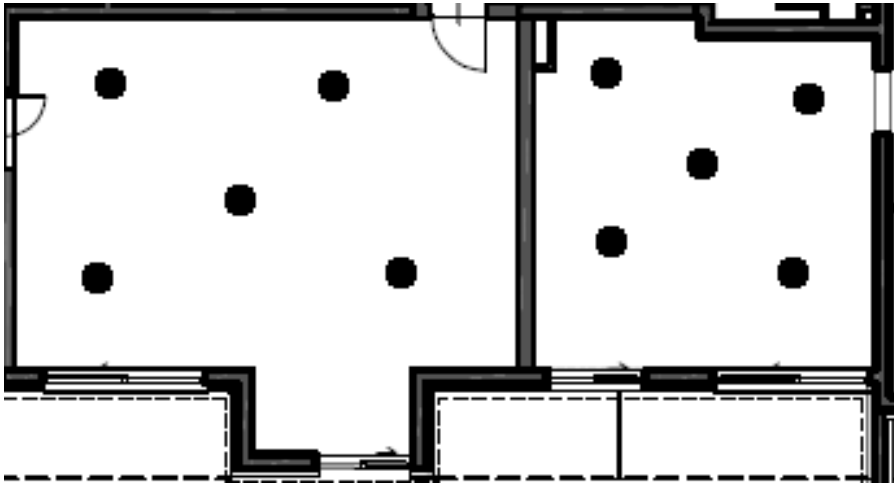
Opis badanego obiektu Badane przegrody były ścianami zewnętrznymi oraz międzymieszkaniowymi w kompleksie budynków mieszkalnych na terenie Krakowa. Miały one konstrukcję żelbetową, ściany zewnętrzne zostały wykonane z bloków wapienno–piaskowych typu SILKA o grubości 30 cm, z warstwą wełny mineralnej o grubości 15 cm. Ściany międzymieszkaniowe zostały wykonane z bloków silikatowych o grubości 25 cm z tynkiem cementowo–wapiennym. Badaniami objęto dwa różne pomieszczenia o powierzchniach 81,76 m² oraz 61,6 m².

Aparatura pomiarowa Pomiary wykonano za pomocą miernika poziomu dźwięku SVAN 971 i przedwzmacniacza typ SV 18 firmy SVANTEK oraz mikrofonu typ 7052E firmy ACO. Wyposażenie pomiarowe jest regularnie wzorcowane w laboratorium wzorcującym, zaś przed pomiarami dokonano kalibracji toru pomiarowego. Szum różowy wytworzono za pomocą wzmacniacza SWA100 oraz źródła wszechkierunkowego OS002. Wyposażenie pomiarowe ukazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Zdjęcie wyposażenia pomiarowego w wybranym pomieszczeniu nadawczym

Metodyka pomiarowa Pomiar izolacyjności wykonano kierując się zasadami zawartymi w normie [4]. Wykonano po pięć pomiarów w pomieszczeniu nadawczym oraz odbiorczym, zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 2. Pomiar czasu pogłosu (RT) wykonano w trzech punktach pomiarowych wewnątrz pomieszczenia odbiorczego, w pasmach 1/3 okta-
wowych w zakresie od 100 Hz do 3150 Hz.



Rysunek 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych (po lewej pomieszczenie nadawcze, po prawej pomieszczenie odbiorcze)

Pomiar tła akustycznego wykonano w trzech punktach w każdym pomieszczeniu odbiorczym. W celu zminimalizowania wpływu tła akustycznego, parametry źródła ustawiano tak, aby różnica pomiędzy poziomem dźwięku A zmierzonym w pomieszczeniu odbiorczym podczas pracy źródła, a tłem akustycznym wynosiła powyżej 10 dB.

Izolacyjność akustyczna właściwa jest definiowana dziesięć logarytmów ze stosunku mocy akustycznej W_1 padającej na badaną przegrodę do mocy akustycznej W_2 przenoszonej przez próbkę

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad (1)$$

Pomijając przenoszenie boczne oraz przyjmując pola akustyczne w pomieszczeniach nadawczych i odbiorczych jako idealnie rozproszone, izolacyjność akustyczną R , od dźwięków powietrznych można obliczyć korzystając ze wzoru [3]

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2)$$

gdzie:

L_1 – średni poziom dźwięku w pomieszczeniu nadawczym [dB],

L_2 – średni poziom dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym [dB],

S – powierzchnia badanej przegrody [m^2],

A – chłonność akustyczna pomieszczenia.

Konstrukcja budżetu niepewności Izolacyjność akustyczna przegród budowlanych zależy od wielu zmiennych, zatem należy ją wyliczać zgodnie z [8, 9]:

$$Y = f(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) \quad (3)$$

gdzie Y jest to mezurand, który jest określony za pomocą n bezpośrednio zmierzonych wielkości X_n . Każdej z nich towarzyszy niepewność $U(X_i)$.

Stosując prawo propagacji niepewności standardowych poszczególnych nieskorelowanych ze sobą składowych, wyznacza się niepewność standardową poszerzoną $U_c(Y)$, wyrażoną wzorem (3):

$$U_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i)} \quad (4)$$

gdzie $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ -- współczynnik wrażliwości, oznaczany również jako c_i .

Wskaźnik izolacyjności właściwej przybliżonej R' przyjmuje postać:

$$R' = (L_1 - L_2) + 10 \log \left[\frac{ST_{30}}{0,16V} \right] \quad (5)$$

gdzie:

L_1 – średni poziom dźwięku w pomieszczeniu nadawczym [dB],

L_2 – średni poziom dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym [dB],

T_{30} – średni czas pogłosu [s];

S – powierzchnia badanej przegrody [m^2],

V – objętość pomieszczenia [m^3].

W przypadku, gdy wielkości nie są ze sobą skorelowane, niepewność standardową $u(R')$ przeprowadzono za pomocą:

$$u(R') = \sqrt{u^2(L_1) + u^2(L_2) + u^2(S) + u^2(V) + u^2(T_{30}) + u^2(A)} \quad (6)$$

gdzie:

$u^2(L_1)$ – niepewność standardowa estymaty poziomu ciśnienia akustycznego zmierzonego w pomieszczeniu nadawczym,

$u^2(L_2)$ – niepewność standardowa estymaty poziomu ciśnienia akustycznego zmierzonego w pomieszczeniu odbiorczym,

$u^2(S)$ – niepewność standardowa estymaty powierzchni badanej przegrody,

$u^2(V)$ – niepewność standardowa estymaty objętości pomieszczenia,

$u^2(T_{30})$ – niepewność standardowa estymaty czasu pogłosu,

$u^2(A)$ – niepewność standardowa estymaty wynikająca z błędów aparatury pomiarowej oraz kalibracji.

Szacowany poziom dźwięku w pomieszczeniu nadawczym oraz odbiorczym dla każdego pasma 1/3 oktawowego w określonej liczbie punktów pomiarowych L_{1j} , L_{2j} wynosi:

$$\dot{L}_{1,2} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{0.1L_{1,2j}} \right) \quad (7)$$

Odchylenie standardowe średniego poziomu ciśnienia akustycznego zmierzonego w pomieszczeniach nadawczych i odbiorczych, w różnych punktach pomiarowych oraz ustawienia źródła, wyliczono następująco:

$$\sigma(L_{1,2}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_{1,j,2j} - \dot{L}_{1,2})^2} \quad (8)$$

zaś niepewność wynosi:

$$u(L_j) = \frac{\sigma(L_j)}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

gdzie $\sigma(L_j)$ jest odchyleniem standardowym z n -pomiarów ciśnienia akustycznego wewnątrz badanego pomieszczenia.

Szacowany czas pogłosu dla każdego pasma 1/3 oktawowego w zadanym zakresie, w pomieszczeniu odbiorczym obliczono za pomocą wzoru:

$$\dot{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i. \quad (10)$$

Kolejno wyliczono odchylenie standardowe z m -pomiarów czasu pogłosu:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (T_i - \dot{T})^2} \quad (11)$$

Zaś niepewność dla tego parametru wynosi:

$$u(T) = \frac{\sigma(T)}{\sqrt{m}} \quad (12)$$

gdzie m jest ilością zmierzonych wartości czasu pogłosu w pomieszczeniu odbiorczym.

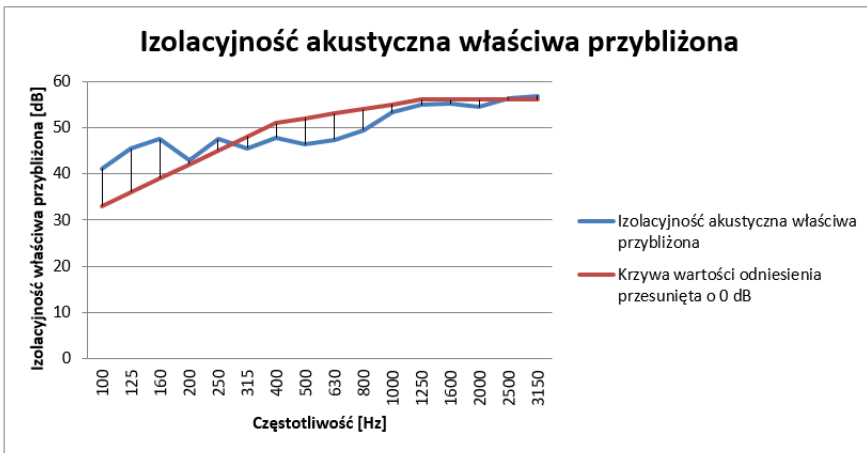
Niepewność dotyczącą powierzchni badanej próbki oraz objętości pomieszczenia odbiorczego, obliczono w procentach a następnie przekonwertowano na skalę decybelową, zgodnie ze wzorem [6]:

$$u(\text{dB}) = 20 \log \left(1 + \frac{u(\cdot)}{100} \right) \quad (13)$$

W celu zapewnienia jakości wyników, obliczano zmienne wejściowe w sposób liniowy, zamiast logarytmicznego. Niepewność końcową obliczono w procentach, a następnie przekonwertowano ją na decybele.

WYNIKI POMIARÓW

Wyniki pomiarów przedstawiono w zakresie od 100 Hz do 3150 Hz, ze względu na fakt, iż w zakresie poniżej 100 Hz występowały duże niedokładności. Na podstawie rysunku 3, przedstawiającego wykres izolacyjności akustycznej przybliżonej właściwej od dźwięków powietrznych, można zauważyć, iż poniżej 250 Hz występują duże wahania wskaźnika izolacyjności, zaś dla wyższych częstotliwości, izolacyjność wzrasta. W okolicy częstotliwości 2000 Hz, widoczny jest „dołek”, związany ze zjawiskiem koincydencji.



Rysunek 3. Wykres izolacyjności akustycznej właściwej przybliżonej wraz z krzywą odniesienia przegrody międzymieszkaniowej)

Zgodnie z procedurą opisaną w [3], otrzymujemy wartość wskaźnika ważonego izolacyjności akustycznej właściwej przybliżonej:

$$R'_w(C; C_{tr}) = 52(-1, -3) [\text{dB}] \quad (14)$$

Dokonano zestawienia głównych czynników mających wpływ na niepewność pomiarową, a następnie dokonano konstrukcji budżetu niepewności oraz zestawiono otrzymane wyniki w tabeli 1.

Zauważono, iż niepewność rozszerzona waha się od 0,66 dB do 2,66 dB. Wartości niepewności są szczególnie duże w zakresie małych częstotliwości. W zakresach od 100 Hz do 315 Hz oraz powyżej 2000 Hz, niepewność wynosi powyżej 1 dB. Jest to zapewne związane z faktem, iż wymiary pomieszczenia nadawczego są stosunkowo małe, w porównaniu do długości fali wytworzonej ze źródła dźwięku. Głównymi źródłami niepewności są pomiary ciśnienia akustycznego wewnątrz pomieszczeń odbiorczych, nadawczych oraz pomiary czasu pogłosu wewnątrz pomieszczenia odbiorcze.

Tablica 1. Budżet niepewności dla pomiarów terenowych izolacyjności przegrody budowlanej od dźwięków powietrznych w pasmach 1/3 oktaowych, od 100 Hz do 3150 Hz (wartości w [dB])

f [Hz]	u(L ₁)	u(L ₂)	u(T ₃₀)	u(V)	u(S)	u(A)	U _c	U 95%
100	0,83	0,78	0,68	0,11	0,06	0,5	1,42	2,85
125	0,71	0,68	0,61	0,11	0,06	0,5	1,27	2,53
160	0,45	0,42	0,38	0,11	0,06	0,5	0,89	1,78
200	0,51	0,49	0,41	0,11	0,06	0,5	0,97	1,93
250	0,49	0,42	0,38	0,11	0,06	0,5	0,91	1,82
315	0,43	0,35	0,27	0,11	0,06	0,5	0,8	1,61
400	0,32	0,29	0,15	0,11	0,06	0,5	0,69	1,38
500	0,21	0,17	0,14	0,11	0,06	0,5	0,6	1,2
630	0,23	0,19	0,09	0,11	0,06	0,5	0,6	1,2
800	0,42	0,36	0,17	0,11	0,06	0,5	0,77	1,55
1000	0,27	0,24	0,2	0,11	0,06	0,5	0,66	1,32
1250	0,17	0,15	0,13	0,11	0,06	0,5	0,58	1,16
1600	0,21	0,17	0,12	0,11	0,06	0,5	0,59	1,19
2000	0,33	0,31	0,25	0,11	0,06	0,5	0,73	1,46
2500	0,38	0,25	0,18	0,11	0,06	0,5	0,71	1,42
3150	0,36	0,33	0,3	0,11	0,06	0,5	0,77	1,54

PODSUMOWANIE

Na potrzeby niniejszej pracy, wykonano terenowe pomiary izolacyjności przegród budowlanych od dźwięków powietrznych wraz z konstrukcją i analizą budżetu niepewności dla tego typu pomiaru. Na podstawie sporządzonego budżetu, wykazano iż niepewność rozszerzona, związana z pomiarami ciśnienia akustycznego w pomieszczeniach nadawczych i odbiorczych, czasu pogłosu, powierzchni oraz objętości pomieszczenia, jest największa w zakresie niskich częstotliwości i może wynosić nawet ponad 2,5 dB. Niepewności cząstkowe, mające największy udział w budżecie niepewności, są związane z pomiarem ciśnienia akustycznego w pomieszczeniach, pomiarem czasu pogłosu, a także z błędem aparatury pomiarowej oraz jej kalibracją.

Wyniki te potwierdzają wyniki uzyskane przez innych badaczy i wskazują, jak ważna jest liczba wykonanych pomiarów i punktów pomiarowych, zarówno poziomu ciśnienia akustycznego jak i czasu pogłosu.

Budżet zawiera główne czynniki mające wpływ na niepewność pomiarową, jednak wymaga dalszego doskonalenia, gdyż należy w nim uwzględnić także szczegółową analizę niepewności związanych z wyposażeniem pomiarowym (często uwzględnianych w świadectwach wzorcowania), warunków meteorologicznych oraz szeregu innych, „nietypowych” uwarunkowań mogących mieć wpływ na wynik niepewności pomiarowej. Ponadto planowane jest wykonanie większej liczby pomiarów izolacyjności przegród, zarówno w terenie, jak i w labo-

ratorium, w celu dokonania obserwacji budżetu niepewności w bardziej złożonych warunkach pomiarowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 140-4:2000 *Akustyka – Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Pomiary terenowe izolacyjności od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami*
- [2] PN-EN ISO 16283-1:2014-05 *Akustyka – Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych*
- [3] PN-EN ISO 717-1:2013-08 *Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych*
- [4] WSZOLEK T.: *Uncertainty of sound insulation measurement in laboratory*, Archives of Acoustics, 2007,32(4),271-277
- [5] IZEWSKA A.: *Niepewność pomiarów izolacyjności akustycznej przegród budowlanych i ich elementów*, Prace Instytutu Techniki Budowlanej, Kwartalnik nr 2 (154) 2010
- [6] Tarek M. El-Basheer, Rabab S. Youssef, Hatem Kh. Mohamed: *NIS method for uncertainty estimation of airborne sound insulation measurement in field*, Int. J. Metrol. Qual. Eng. 8, 19 (2017)
- [7] *Wyrażanie niepewności pomiaru*, Przewodnik GUM, Warszawa 1999
- [8] WSZOLEK T.: *Uncertainty of LDEN level estimation for corona noise of UHV transmission lines*, International INCE Symposium, Le Mans (2005)
- [9] PN-EN ISO 12999-1:2014 *Akustyka – Wyznaczanie i stosowanie niepewności pomiarów w akustyce budowlanej. Część 1: Izolacyjność akustyczna*

Część II

Akustyka i muzyka

Andrzej MADRO

**MUZYKA METALOWA PO CYFROWEJ REWOLUCJI
– OD INŻYNIERII AKUSTYCZNEJ DO TECHNO-ESTETYKI**

*Akademia Muzyczna w Krakowie
e-mail: andrzejmadro@gmail.com*

Heavy Metal Thunder – BRZMIENIE I TOŻSAMOŚĆ

Estetyka muzyczna i gatunkowa tożsamość heavy metalu zbudowana jest przede wszystkim w oparciu o ciężar i ostrość brzmienia. Wskazuje na to już sama nazwa. Kluczowym wyznacznikiem, ważniejszym nawet od wrzaskliwych partii wokalnych i energetycznej perkusji, wydaje się tu brzmienie przesterowanej gitary elektrycznej. Jego indywidualizacja i coraz to nowe warianty od samego początku stanowiły dla wielu muzyków cel sam w sobie, dość przypomnieć Jimmy'ego Page'a z Led Zeppelin (niepowtarzalne brzmienie w *Black Dog*), Briana Maya z Queen (grającego na instrumencie własnej konstrukcji, z użyciem pięciopensówki zamiast plektronu) czy Jimiego Hendrixa (efekty typu wah-wah, eksperymentalna praca studyjna). Także późniejsze metalowe podgatunki, podobnie jak większość subkultur stających na przekór mainstreamu, definiują się właśnie poprzez różnicowanie¹. Muzycy wolą nie tyle wiązać się i identyfikować z określonym nurtem czy sceną muzyczną, co oddzielać się od innych. Ta subkulturowa – brzmieniowa, stylistyczna, estetyczna – odrębność i swoistość dla wielu metalowych twórców, ale i odbiorców staje się bardzo ważna.

Przesterowanie dźwięku efektami typu *overdrive*, *fuzz* czy *distortion* z czasem stało się dla muzyki rockowej i metalowej nie tylko znakiem rozpoznawczym, ale i fundamentem kompozycji. Riff – podstawowa jednostka formalna – jest wszak nie tylko motywem dźwiękowym czy frazą, ale i wyrazistą jakością brzmieniowo-fakturalną. Inżynieria owego brzmienia, jego ewolucja i przeobrażenia, od początku opierały się na znajdowaniu i wykorzystaniu coraz to nowych urządzeń analogowych (wzmacniaczy i przetworników) oraz ich wynalazczych rekonfiguracji. Dzięki cyfrowej rewolucji metalowa brzmieniowość zyskała także szanse na zaistnienie i rozwój w domenie wirtualnej. Z jednej strony pozwoliło to na przekroczenie niedoskonałości i ograniczeń hardware'u, z drugiej zaś umożliwiło wyabstrahowanie i modelowanie barwy za pomocą interaktywnych interfejsów graficznych.

Przemiany w obrębie stylistyki i brzmienia muzyki metalowej nabrały tempa w latach 90-tych kiedy to do powszechnego użytku zaczęły wchodzić gitary siedmiostrunowe. Sięgnęły po nie tuż muzyki progresywnej jak Steve Vai, Devin Townsend czy John Petrucci, ale też pionierzy bardziej komercyjnego nu metalu – przede wszystkim członkowie zespołu

¹ Jonathan Pieslak, *Re-casting Metal: Rhythm and Meter in the Music of Meshuggah*, Music Theory Spectrum 29, 2007, no. 2, s. 219

KoRn. Poszerzenie dźwiękowej przestrzeni postawiło przed twórcami efektów i realizatorami nagrań nowe wyzwania, ale i wyznaczyły pespektywy dalszego rozwoju, bo również systemy nagłośnieniowe poszerzyły dostępne dla muzyki spektrum częstotliwościowe. Idea metalowych gitarzystów stało się wówczas radykalne obniżenie brzmienia, przy zachowaniu maksymalnej wyrazistości i precyzji rytmicznej. Prawdziwą rewolucję technologiczną i estetyczną w tym zakresie rozpoczął Fredrik Thordendal (gitarzysta szwedzkiego zespołu Meshuggah łączonego z nurtem extreme metalu). W 2002 roku rozpoczął on eksperymenty z siedmio- i ośmiostrunowymi gitarami wspieranymi cyfrowym przetwarzaniem dźwięku². Zmodyfikował także technikę gry, jako że w niskim rejestrze niepraktyczne stało się używanie powerchordów. Stąd też w muzyce wymienionego wyżej zespołu Meshuggah znaleźć można niemal wyłącznie jednogłosowe riffy³. Celem gitarzysty stało się zatem uzyskanie takiego brzmienia, które nawet przy użyciu pojedynczych dźwięków wypełniłoby większą przestrzeń spektralną.

Nowatorstwo uzyskiwanych przez Thordendala i zespół Meshuggah brzmień (płyty *Nothing* z roku 2002 czy *Catch ThirtyThr33* z 2005) zafascynowało i zainspirowało wówczas wielu młodych muzyków na całym świecie, co w połączeniu z rozpowszechnieniem i profesjonalizacją nagrywania domowego (także dystrybuowania i promocji) pozwoliło zaistnieć nowej scenie muzycznej o nazwie djent (czytaj: džent), stanowiącej obecnie swoistą modernę metalu, a zarazem najlepszą egzemplifikację asymilowania technologii cyfrowych w tego rodzaju twórczości⁴.

Digital natives – digital metal, CZYLI ZŁAMANIE CYFROWEGO TABU

Przez dekady rockowi i metalowi gitarzyści borykali się z trudnościami w nagłaśnianiu swoich instrumentów podczas koncertów. Początkowo używano jedynie tzw. pieców, czyli wzmacniaczy z wbudowanymi głośnikami, które ustawiane na scenie gwarantowały bezpośrednią kontrolę wykonawcy nad brzmieniem – kolumny odsłuchowe były zbędne. Potrzeba coraz większej mocy (np. w otwartej przestrzeni koncertów stadionowych) powodowała konieczność przesyłania sygnału do zewnętrznego systemu nagłośnieniowego. By nie tracić charakterystycznego dla wzmacniacza gitarowego brzmienia muzycy zmuszeni byli do stosowania mikrofonów (dynamicznych, rzadziej pojemnościowych), co niekiedy powodowało dalsze utrudnienia i komplikacje⁵. Sytuacja ta uległa zmianie w erze nowych mediów.

² Wybitnie transgresywny, scjentystyczny i spekulatywny charakter twórczości szwedzkiego zespołu przejawia się także w eksperymentowaniu z formą i narracją, ostentacyjną dysonansowością, atonalnością czy wykorzystaniem syntetycznej perkusji.

³ *The eight-strings really have given us a whole new musical vocabulary to work with. Part of it is the restrictions they impose: you really can't play power chords with them; the sound just turns to mush. Instead, we concentrated on coming up with really unusual single-note parts, new tunings and chord voicings. We wanted to get as far away from any kind of conventions and traditions.* Fredrik Thordendal, za: Rod Smith, *Cover History: Meshuggah*. "Decibel Magazine" nr 6, 2005 (<https://www.decibelmagazine.com/>)

⁴ Zob. Andrzej Mądro, *From Psychedelia to Djent – Progressive Genres as a Paradox of Pop Culture*, [w]: Julia Merrill (eds) *Popular Music Studies Today*. Systematische Musikwissenschaft. Springer VS, Wiesbaden 2017

⁵ Sama kwestia ustawienia takiego mikrofonu staje się problematyczna – im bliżej membrany, tym więcej dolnych częstotliwości w brzmieniu (tzw. efekt zbliżeniowy). Natomiast ustawienie mikrofonu w stosunku do osi głośnika wygląda tak – im bliżej środka, tym brzmienie jest jaśniejsze, a im dalej (bliżej krawędzi membrany) tym brzmienie staje się bardziej matowe.

Brzmienia elektroniczne, syntezatory, nie mówiąc już o automatach perkusyjnych były w metalu lat 80-tych swego rodzaju tabu. Do dziś zresztą społeczność metalowych gitarzystów jest podzielona na zwolenników technologii analogowych i cyfrowych. Niektórzy muzycy twierdzą, iż doświadczone uszy potrafią dostrzec różnicę między sygnałem przetwarzanym cyfrowo a opartym na lampach próżniowych⁶. Przez wiele lat faktycznie nie udawało się skonstruować urządzenia dającego satysfakcjonujące rezultaty brzmieniowe. Ale w XXI wieku, wraz z galopującym postępem technicznych, sytuacja uległa znaczącej zmianie. Obecnie możliwości elektroniki są na tyle duże, że wirtualne końcówki mocy oraz tzw. splotowe symulatory głośników⁷ są w stanie przywołać wrażenie prawdziwie lampowego brzmienia. Otwarte pozostaje jednak pytanie czy końcowy efekt symulacji rzeczywistego wzmacniacza może okazać się dla słuchacza atrakcyjniejszy niż analogowy pierwowzór.

Komercyjna rejestracja i produkcja muzyczna (zwłaszcza radio-telewizyjna) od dawna już przeszła na efektywniejsze technologie cyfrowe. Również na poziomie sprzętu gitarowego ogólnodostępna, coraz tańsza elektronika – komputery, procesory efektów, oprogramowanie studyjne – pozwala zastąpić dotychczasowe media analogowe – gitarowe wzmacniacze, przetworniki, studyjne konsolety mikserskie – i niejako przenieść ich możliwości do domeny wirtualnych stacji roboczych. Dzięki temu wiele zespołów może rozpocząć swą działalność nagraniową w zaciszu domowego studia nagrań złożonego z komputera z kartą dźwiękową i zaopatrzonego w kilka programów. Tym, co dodatkowo przyciąga do procesorów cyfrowych jest precyzja sterowania i pełna powtarzalność procesów. Przywoływanie skomplikowanych konfiguracji, tzw. presetów, jest tu bardzo łatwe.

Obecnie większość młodych muzyków rozpoczynających karierę i bazujących na własnej produkcji muzycznej woli używać software'u emulującego rzeczywiste urządzenia analogowe. Mogą to być zarówno darmowe wtyczki, jak i profesjonalne urządzenia zewnętrzne typu Line 6 Pod czy Axe FX firmy Fractal Audio. Ten ostatni procesor efektów, produkowany od 2006 roku, stał się dla metalu prawdziwym przełomem. Axe FX daje dostęp do kilkudziesięciu (a w ostatniej, trzeciej już generacji nawet kilkuset) doskonałych jakościowo symulacji wzmacniaczy gitarowych i lampowych końcówek mocy. Dzięki temu można podłączyć go zarówno do typowo gitarowej kolumny, jak i – korzystając z wysokiej jakości symulacji – głośnika szerokopasmowego⁸. Wygodny interfejs graficzny umożliwia muzykowi dowolne budowanie łańcuchów i łączenie bloków efektów. Każdy element może być użyty wielokrotnie, bo moc obliczeniowa swobodnie pozwala na pracę kilkunastu efektów jednocześnie. Co więcej, firma Fractal Audio dba by urządzenie zyskiwało coraz to lepsze oprogramowanie, stąd jego liczne aktualizacje. Praca z tego rodzaju cyfrową syntezą dźwiękową w studio daje możliwość eksperymentowania z barwą „na bieżąco”, za pomocą interaktywnych interfejsów.

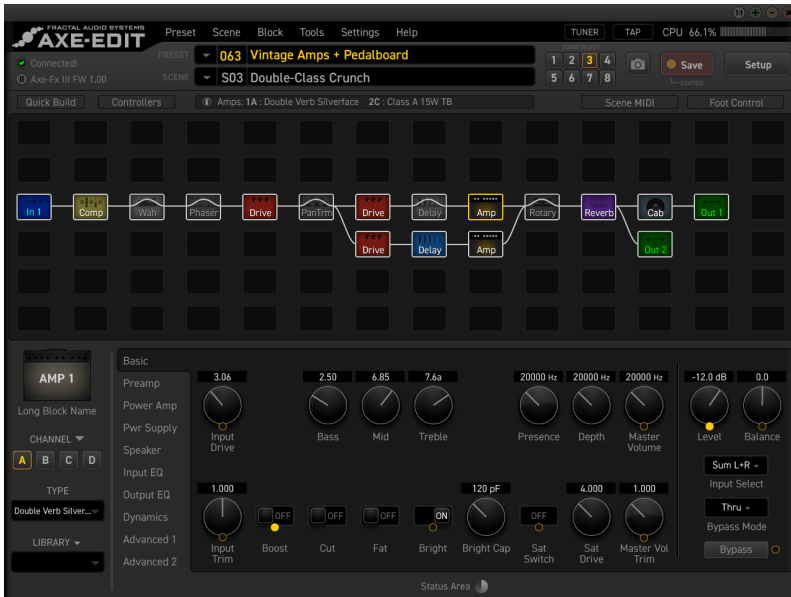
⁶ Matt Shelvock, *The Progressive Heavy Metal Guitarist's Signal Chain: Contemporary Analogue and Digital Strategies*, KES Transactions on Innovation in Music, Vol 1 No 1, Special Edition: Innovation in Music, s. 132

⁷ Symulacja głośnika za pomocą tzw. odpowiedzi impulsowych (czyli nagranych w pliku .wav reakcji układu na pobudzenie) jest dziś bardzo popularną metodą uzyskania dobrego brzmienia gitarowego. W sieci dużo jest różnych „paczek impulsów” i darmowych wtyczek realizujących konwolucję, czyli splot sygnałów. W niektórych możliwe jest wykorzystanie własnych impulsów. Ładuje się je do wtyczki realizującej splot sygnałów. Wtyczkę VST tego rodzaju oferuje m.in. darmowe plug-iny LePou (<https://lepouplugins.blogspot.com/>).

⁸ Popularne podczas koncertu jest podłączenie wyjścia *OUTPUT1* z symulacją głośnika do miksera i zestawu *PA*, a po wstawieniu bloku efektów przed blokiem kolumny – wyprowadzenie sygnału bez symulacji głośników na wyjście *OUTPUT2* i stąd bezpośrednio do fizycznej końcówki mocy i paczki gitarowej, działającej jako swoisty odsłuch.

Takie kształtowanie dźwięku stanowi dziś podstawę warsztatu realizacyjnego progresywnej muzyki metalowej, czego przykładem jest działalność Mishy Mansoora, lidera najpopularniejszego zespołu sceny djentowej – Periphery.

PRZYKŁAD 1. INTERFEJS GRAFICZNY KOMPUTEROWEGO OPROGRAMOWANIA AXE FX II



Nowe media dały muzyce metalowej narzędzia, dzięki którym barwa stała się bardziej uchwytną, mierzalną jakością muzyczną. To, co wcześniej można było wyłącznie subiektywnie opisać i uzyskiwać drogą eksperymentów, teraz, m.in. dzięki komputerom, można w rozmaity sposób obrazować, porównywać i dokładnie mierzyć. Nowe narzędzia analityczne, jak np. spektrografy, sprawiły, że można wreszcie zajrzeć „w głąb” dźwięku, niejako zobaczyć go od środka. Twórca na bieżąco może śledzić rezultaty brzmieniowe swojej pracy. Następuje wówczas swego rodzaju złączenie i współkonstytuowanie się procesu kompozycji i produkcji.

Wirtualne środowiska komputerowe to przełom nie tylko w zakresie obrazowania oraz interaktywnego kształtowania, ale też potencjał uzyskania brzmienia niemożliwego do zrealizowania w technologii analogowej. Rezultat dźwiękowy staje się wówczas brzmieniowym symulakrum, czyli wirtualną „kopią bez oryginału”. Również odbiorca może nie być świadomy, czy barwa, którą słyszy, powstała naturalnie czy jest emulowana bądź generowana cyfrowo. Tę nową sytuację ontologiczno–estetyczną sytuację można nazwać „płynną tożsamością” dźwięku⁹.

⁹ Ryszard W. Kluszczyński, *Spółczesność informacyjna. Cyberkultura. Sztuka multimediów*, Rabid, Kraków 2001, s. 43

... *but does it djents?*, CZYLI POWAB BRZĘCZENIA

Djent jest jednym z najmłodszych podgatunków metalu progresywnego – z jednej strony stanowi kontynuację i radykalizację metalu technicznego, groove metalu i mathcore’u, z drugiej zaś jest mieszaniami tych gatunków z brzmieniami syntetycznymi, programowaną perkusją, dark ambientem, a nawet jazzem. Samo słowo „djent” pojawiło się wpieryw jako onomatopeja¹⁰, jako że brzmienie gitar stało się dla pionierów nowego nurtu głównym kryterium twórczym. Brzmienie to najłatwiej uzyskać za pomocą multi–efektów cyfrowych. Świetnym tego przykładem jest działalność artystyczna Tosina Abasi, czarnoskórego gitarzysty, twórcy metalowego tria instrumentalnego o nazwie Animals as Leaders, który od początku kariery korzysta niemal wyłącznie z urządzeń typu *virtual analog*. Już podczas produkcji pierwszej płyty nie użył on mikrofonów i tradycyjnych pieców gitarowych, a jedynie ich wirtualne symulatory¹¹. Z kolei partie perkusyjne zostały wygenerowane komputerowo. Mimo to, album został uznany za jeden z najlepszych progresywnych wydawnictw roku 2009¹².

Uzyskanie nowoczesnego, djentowego brzmienia wymaga modyfikacji techniki wykonawczej (szarpanie strun pod innym kątem i bliżej gryfu¹³), ale też odpowiednio skonfigurowanych efektów. Do uzyskania takiego brzmienia nie wystarczy sam piec, lecz cały zestaw przesterów, kompresorów, korektorów graficznych, bramek szumów i oczywiście odpowiednio dobrane gitarowe przedwzmacniacze, tzw. przystawki. Istotny jest tu nie tylko ciężar brzmieniowego rezultatu, ale też precyzja, jako że w progresywnym metalu musi być miejsce na wirtuozerię i klarowność rytmiczną (co odróżnia go od np. nu metalu), dlatego niekiedy stosują nawet trzy bramki szumów¹⁴.

PRZYKŁAD 2. SCHEMAT POŁĄCZENIA EFEKTÓW TYPOWY DLA DJENT METALU

Wzmacniacze lampowe są często wykorzystywane do zwiększenia dynamicznego zakresu mocy gitary, dlatego kompresory były rzadkością w tradycyjnym heavy metalu. Tymczasem w djencie znajdują szerokie zastosowanie i są umieszczane tuż po wyjściu gitarowym. Intencją jest tu zmniejszenie zakresu dynamicznego. Kompresja sygnału gitary na początku łańcucha pozwala na bardziej równomierny atak, zwłaszcza w przypadku artykulacji *palm–muted* (tłumienie strun krawędzią dłoni). Ta technika w połączeniu z mocnym, nieco ukośnym szarpaniem strun daje dźwięk agresywny, „skrzeczący” i nasycony w szerokim zakresie częstotliwości. Ze względu na zdecydowanie niższy strój gitar (niemal oktawę niżej!) gitarzyści

¹⁰ Jamie Thomson, *Djent, the metal geek’s microgenre* (<https://www.theguardian.com/music/2011/mar/03/djent-metal-geeks>)

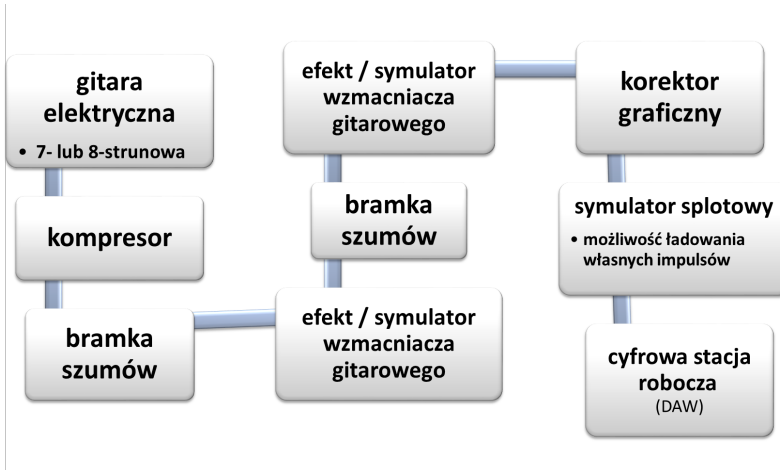
¹¹ Producentem debiutanckiego albumu grupy wydanego w 2009 roku był Misha Mansoor, założyciel najbardziej cenionego obecnie zespołu djentowego pod nazwą Periphery i autorytet w dziedzinie produkcji muzycznej.

¹² M.in. przez metalsucks.net

¹³ Chodzi o to by jednocześnie szarpać i ocierać strunę, co powoduje uwypuklenie transjentów wzbogacających widmo dźwięku.

¹⁴ Najczęściej pierwsza brama poprzedza kompresję i przesterowanie przed wejściem do wejścia wzmacniacza, a druga jest umieszczona w pętli efektów wzmacniacza. Funkcja *overdrive* i kompresja pomagają „walczyć” z bramką szumów, utrzymując sygnał bardziej jednolity i pozwalając gitarzyście na większą kontrolę, gdy sygnał dotrze do bramki szumu. Następnie stosuje się korektor graficzny w celu zrekompensowania utraty zawartości częstotliwości przez bramki.

djentowi bardziej dbają o klarowność sygnału poprzez uwypuklenie zakresu średniego i wysokiego. Korektorem graficznym ścina się pasmo poniżej 200 Hz, wzmacnia zaś rejestry w okolicy 800 i 1600 Hz, odpowiadające za wyrazistszy atak struny.



Djent jest beneficjentem cyfrowej rewolucji w jeszcze innym aspekcie. Pionierzy nurtu należą bowiem do pokolenia tzw. „cyfrowych tubylców”¹⁵, którzy dzięki forom internetowym i mediom społecznościowym dosyć szybko zawiązali środowisko muzyków (gitarzystów – kompozytorów – producentów), także odbiorców i fanów nowego brzmienia. Djent nie kształtował się tak jak wiele starszych gatunków metalu opierając się na publikacjach płytowych oraz tradycyjnych mass mediach radiowych i telewizyjnych, lecz rozprzestrzenił się głównie nowymi, nieskrępowanymi kanałami komunikacji¹⁶, stając się swoistą alternatywną subkulturą sieciową – metalową cyberkulturą. Gitarzyści chętnie korzystają z serwisów takich jakich soundclick, sevenstring.org, mySpace i YouTube gdzie można słuchać i komentować ich muzykę. Można tu komponować oraz – własnym sumptem – nagrywać i publikować próbki dźwiękowe i fragmenty utworów, ale też wymieniać się konfiguracją sprzętu i plug-inów, czy nawet publikować swoiste samouczki dla mniej doświadczonych muzyków. Gitarzyści–producenci, tacy jak Misha Mansoor czy Tosin Abasi, coraz częściej dzielą się w mediach społecznościowych nie tyle utworami, co oryginalną konfiguracją swojego sprzętu, dające atrakcyjne, unikatowe brzmienie. To zupełnie nowy rodzaj artystycznej twórczości muzycznej.

¹⁵ David Prensky, *Digital Natives, Digital Immigrants*, „On the Horizon”, MCB University Press, Vol. 9 No. 5, 2001

¹⁶ Robert Strachan, *Sonic Technologies: Popular Music, Digital Culture and the Creative Process*, Bloomsbury Publishing USA 2017, s. 149

TECHNO–ESTETYKA¹⁷ METALU, CZYLI PIĘKNO TECHNOLOGII

Cyfrowa rewolucja zmieniła świat sztuki muzycznej, niemal w każdym jego aspekcie i na każdym polu. Nowe media stały się wszechobecne – zmieniły się sposoby komponowania, zapisu, nagrywania, wykonywania, słuchania oraz rozpowszechniania muzyki. Muzycy związani z dżentem stanowią kwintesencję tego rodzaju progmetalowej moderny. Napędzani wiarą w technikę, kult rzemiosła i artystyczny sens nieustannego rozwoju stają naprzeciw tendencjom *lo-fi*¹⁸, wiodącym w środowiskach kontrkulturowej twórczości punkowej i black metalowej. Dzięki temu metal nadal rozszerza i pluralizuje swą stylistykę i estetykę, próbuje asymilować technologie i środki dotychczas wyrugowane.

Nowoczesny metal to zatem nie tylko wirtuozeria instrumentalna, nowe techniki artykulacyjne i wykonawcze, ale też supremacja techniki i audiofilizm podparty nieustannym poszukiwaniem i eksperymentowaniem. Jakość gitarowych brzmień zależy tu od umiejętności muzycznych, ale i od poziomu kompetencji technologicznych artysty. Bez sprawnego posługiwania się elektroniką i komputerem w zasadzie nie sposób działać na tym polu. Zresztą w muzyce XXI wieku – każdego rodzaju: czy to poważnej czy popularnej – coraz mniej liczą się same struktury dźwiękowe, a coraz bardziej brzmienie, jego faktura i przestrzeń. Wartością artystyczną staje się nie tylko sposób organizacji materiału dźwiękowego, ale i biegłość w kreatywnym operowaniu nowymi muzycznymi mediami i technologiami. Dla wielu twórców i muzyków–producentów związanych z podobnymi do dżentu, zwłaszcza progresywnymi nurtami muzyki metalowej, zdigitalizowany i zwirtualizowany proces reżyserii i produkcji dźwiękowej staje się nie tylko ważnym elementem kompozycji muzycznej, ale i aktem twórczym, sztuką samą w sobie. Twórczość tak pojęta wpisuje się w nowy rodzaj artystycznej działalności, który ukazuje „piękno technologii”¹⁹.

Warto jednak zwrócić uwagę na skutek uboczny tego fenomenu – fetyszyzację i estetyzację urządzeń. Artefakty i akcesoria elektroniczne niekiedy przestają być postrzegane jedynie jako zlepek kabli i układów scalonych i zaczynają być traktowane, podobnie jak tradycyjne instrumenty, jako piękne konstrukcje²⁰. Potrzeba nadania wartości estetycznej oraz czerpania przyjemności z użytkowania urządzeń, bezpośrednio wiąże się ze zmianą ich statusu we współczesnej rzeczywistości. Piotr Celiński zauważa, że „przedmioty medialne i dzieła sztuki mediów okazały się mieć niemieszczącą się w dotychczasowym kanonie form i materii artystycznego wyrazu niematerialną konsystencję, inny stan skupienia. W ten sposób sztuka czy szerzej: kultura znalazły się wewnątrz mediów – zostały zmediatyzowane, wchłonięte przez medialne gramatyki i reguły”²¹.

¹⁷ Pojęcie to odwołuje się do odległych idei, jak grecka filozofia *techné*, ale jest silnie związana z estetyką multimediów: „refleksją swą obejmuje: sposoby tworzenia w sztuce wykorzystujące aparaturę techniczną, najpierw mechaniczną, a obecnie elektroniczną”. Krystyna Wilkoszewska, *Estetyka nowych mediów, Piękno w sieci. Estetyka a nowe media*, Universitas, Kraków 1999, s. 12-15.

¹⁸ Celowa niska jakość nagrań, wykorzystanie szumów, usterkowania, przesterowań, cyfrowych glitchów itp.

¹⁹ David Gelernter, *Mechaniczne piękno. Kryterium estetyczne w informatyce*, przekład A. Radomski, CiS, W.A.B., Warszawa 1999.

²⁰ Łukasz Mirocha, *Techno–estetyka. Dlaczego urządzenia zaczynają nam się podobać?*, <http://czlowiekitechnologie.com>

²¹ Piotr Celiński, *Postmedia. Cyfrowy kod i bazy danych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie–Skołódzkiej, Lublin 2013, s. 22

Paradoksy estetyczne tego rodzaju dotyczą metalu także w stricte muzycznych jego aspektach. Wszak tożsamość i warsztat kompozytorski heavy metalu od zawsze opierała na specyficznych wzorcach brzmieniowych. Hasła takie jak „przesterowanie”, „krzyk”, „szum”, „trzask” w rozumieniu powszechnym odwołują się do negatywnych zjawisk dźwiękowych. Tymczasem zniekształcenie sygnału, zamiast być czymś niepożądanym, same w sobie stają się dźwiękami, co więcej, w pełni wyrażającymi naturę użytych mediów. W perspektywie estetycznej dochodzi tu zatem do znaczącego przewartościowania: brzmienie przesterowane, z natury swej szumowe, szorstkie i „brudne”, staje się wyraziste, wyrafinowane i... piękne?

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alexander, P.J. (1994) *New Technology and Market Structure: Evidence from the Music Recording Industry*, Journal of Cultural Economics 18, s.113-123
- [2] Fisher, J. A. (1998) *Rock 'n' Recording: The Ontological Complexity of Rock Music* [w:] Musical Works: New Directions in the Philosophy of Music, ed. Philip Alperson, Pennsylvania State University Press: s.109-23
- [3] Gracyk, T. (1996) *Rhythm and Noise: An Aesthetics of Rock*. Durham: Duke University Press
- [4] Gracyk T. (2008) *The Aesthetics of Popular Music*, The Internet Encyclopedia of Philosophy, (<http://www.iep.utm.edu/m/music-po.htm>)
- [5] Harrell, J. (1994) *The Poetics of Destruction: Death Metal Rock*, Popular Music and Society 18, no. 1, s. 91-104.
- [6] Hjelm T., Kahn-Harris K., LeVine M. (2011) *Heavy metal as controversy and counterculture*, Popular Music History, Vol 6, s. 5-18
- [7] Jones, S. (1992) *Rock Formation: Music, Technology, and Mass Communication*, SAGE Publications
- [8] Kahn-Harris, K. (2007) *Extreme Metal: Music and Culture on the Edge*. New York: Berg Publishers
- [9] Kahn-Harris, K. (2003) *Death Metal and the Limits of Musical Expression* [w:] Policing Popular Music, ed. Martin Cloonan, Reebee Garofalo, Philadelphia: Temple University Press, s. 81-99.
- [10] Kania, A. (2006) *Making Tracks: The Ontology of Rock Music*. The Journal of Aesthetics and Art Criticism 64 (4), s. 401-414
- [11] Liu-Rosenbaum, A. (2012) *The Meaning in the Mix: Tracing a Sonic Narrative in 'When the Levee Breaks'*. Journal on the Art of Record Production 7. [<http://arpjournal.com/the-meaning-in-the-mix-tracing-a-sonic-narrative-in-'when-the-leveebreaks'>]
- [12] Lucas, O. (2016) *Loudness, Rhythm and Environment: Analytical Issues in Extreme Metal Music*. Doctoral dissertation, Harvard University, Graduate School of Arts & Sciences.
- [13] Marrington, M. (2017) *From DJ to djent-step: Technology and the re-coding of metal music since the 1980s*, Metal Music Studies, Vol. 3, No. 2, s. 251-268
- [14] Mądro, A. (2017) *From Psychedelia to Djent – Progressive Genres as a Paradox of Pop Culture*, [w:] Julia Merrill (eds) Popular Music Studies Today. Systematische Musikwissenschaft. Springer VS, Wiesbaden 2017
- [15] Pieslak, J. (2007) *Re-casting Metal: Rhythm and Meter in the Music of Meshuggah*, Music Theory Spectrum 29, no. 2, s. 219-245
- [16] Pieslak, J. (2008) *Sound, Text and Identity in Korn's 'Hey Daddy'*, Popular Music 27, no. 1, s. 35-52
- [17] *Progressive Rock Reconsidered* (2002) ed. Kevin Holm-Hudson, New York: Routledge

-
- [18] Shelvock, M. (2013) *The Progressive Heavy Metal Guitarist's Signal Chain: Contemporary Analogue and Digital Strategies*, KES Transactions on Innovation in Music: Vol 1 No 1, Special Edition - Innovation in Music, s. 126-138
- [19] Strachan R. (2017) *Sonic Technologies: Popular Music, Digital Culture and the Creative Process*, Bloomsbury Publishing USA
- [20] Taylor T. D. (2014) *Strange Sounds: Music, Technology and Culture*, Routledge
- [21] Thomson, J. (2011) *Djent, the metal geek's microgenre*, The Guardian (<https://www.theguardian.com/music/2011/mar/03/djent-metal-geeks>)
- [22] Théberge, P. (2001) *'Plugged in': Technology and Popular Music* [w:] *The Cambridge Companion to Pop and Rock*, ed. Simon Frith, Will Straw, John Street, Cambridge University Press
- [23] Walser, R. (1993) *Running with the Devil: Power, Gender, and Madness in Heavy Metal Music*. Middletown, CT: Wesleyan University Press
- [24] Weinstein, D. (2000) *Heavy Metal: The Music and its Culture*. New York: Da Capo Press

Marek PLUTA

KORPUS AUTOMATYCZNEGO SYNTEZATORA FRAZY DLA INSTRUMENTÓW DĘTYCH ORKIESTRY SYMFONICZNEJ

*Akademia Muzyczna w Krakowie
e-mail: psi0expikx@gmail.com*

Streszczenie: Artykuł omawia założenia, strukturę oraz zawartość korpusu automatycznego syntezy frazy (ASF) z próbek wielonutowych. ASF jest rozwinięciem metody syntezy samplingowej o elementy metody konkatencyjnej. Podobnie jak synteza konkatencyjna generuje naturalne przejścia między dźwiękami, nie wymaga jednak stosowania wielu charakterystycznych dla niej algorytmów i technik – transpozycji próbek, dynamicznej transformacji skali czasu, czy relacyjnych baz danych. W zamian wykorzystuje specjalnie skonstruowany korpus obejmujący kompletny zestaw próbek jedno i wielonutowych, nagranych na potrzeby syntezy. Korpus ten umożliwia syntezę partii instrumentów dętych orkiestry symfonicznej składających się z dowolnych sekwencji wysokości, z zachowaniem naturalnych stanów przejściowych pomiędzy dźwiękami.

SYNTEZA DŹWIĘKU W OPARCIU O ZAPIS NUTOWY

Jednym z kluczowych muzycznych zastosowań syntezy dźwięku jest reprodukcja partii instrumentów akustycznych w aranżacji, bądź też podczas edycji materiału nutowego w kompozycji oraz przy składzie nut. Cechami odróżniającymi takie zastosowanie od zwykłej gry na synteźniku jest sterowanie synteźnikiem przez sekwencer oraz dostępność materiału nutowego przed jego odtworzeniem. Pierwsza z cech może mieć negatywne konsekwencje. Na skutek usunięcia z procesu gry czynnika ludzkiego generowany sygnał może wywoływać u słuchaczy wrażenie nienaturalności. Do pewnego stopnia może to skompensować druga z cech. Dostępność materiału nutowego umożliwia jego wcześniejszą analizę, co w połączeniu z odpowiednią modyfikacją parametrów syntezy w sekwencerze pozwala na pewien stopień imitacji interpretacji utworu przez żywego wykonawcę.

Od dłuższego już czasu podstawową metodą syntezy wykorzystywaną w opisywanych zastosowaniach jest synteza samplingowa. Zaletą samplerów jest niewielka złożoność obliczeniowa, co przekłada się na możliwość jednoczesnej syntezy bardzo dużych grup różnych instrumentów. Co równie ważne, w wielu przypadkach instrumenty te są imitowane w bardzo realistyczny sposób. Dotyczy to przede wszystkim instrumentów posiadających oddzielne źródła drgań dla każdej wysokości, takich jak fortepian lub wibrafon, w których nie występuje problem stanu przejściowego pomiędzy wysokościami. Możliwe jest wówczas proste odtworzenie sekwencji próbek, z których każda zawiera nagranie pojedynczego dźwięku. Jednak w przypadku instrumentów takich jak flet lub skrzypce, istotną częścią wrażenia słuchowego jest charakterystyczne przejście pomiędzy dźwiękami, zależne zarówno od artykulacji, jak i konkretnej pary łączonych wysokości. Tradycyjne próbki nie obejmują tej części dźwięku.

Bardziej zaawansowane samplery opierają się na technice multisamplingu [1] ze zbiorami próbek sięgającymi niekiedy 10000 różnych nagrań dla pojedynczego instrumentu. Wykorzystują ponadto metody przetwarzania sygnałów i elementy innych technik syntezy, przede wszystkim subtraktywnej, addytywnej i granularnej, w celu transformacji próbek [2,3]. W najnowszych rozwiązaniach implementowane są interpretery języków skryptowych stosowane do automatyzacji wybranych czynności i uzależnienia wyboru ustawień od określonych kontekstów. Cechy te sprawiają jednak, że prosta, wydajna metoda staje się skomplikowana i pracochłonna w użyciu. Poszerza się grupa realistycznie imitowanych instrumentów, lecz nakład pracy konieczny do uzyskania zadowalającego efektu ogranicza zastosowania najbardziej zaawansowanych samplerów do sytuacji, w których priorytet efektu brzmieniowego jest na tyle wysoki, że uzasadnia to poświęcenie znaczącej, o ile nie przeważającej, części czasu pracy z utworem na obsługę syntezy.

Interesującą alternatywą dla samplingu jest metoda konkatenacyjna, przeniesiona na grunt muzyczny z syntezy mowy. Podobnie jak sampling zalicza się ona do grupy metod reprodukcyjnych, operujących nagraniami, jednak opiera się na odmiennych założeniach. Szczególnie dobrze wydaje się odpowiadać wymienionym wyżej zastosowaniom, w których celem jest interpretacja i realizacja przygotowanego wcześniej materiału nutowego. Metoda konkatenacyjna, zwana również mozaikową (*mosaicing synthesis*), bywa rozpatrywana jako jedna z odmian metody samplingu [4], albo przeciwnie – jako jej najbardziej ogólne sformułowanie [5]. Operuje ona bazą danych obejmującą nagrania instrumentów. Baza dedykowana jednej, określonej implementacji, jest nazywana korpusem. Nagrania w bazie są podzielone na segmenty w dziedzinie czasu, nazywane jednostkami. Mogą one reprezentować obiekty dźwiękowe różnego poziomu, od krótkich wycinków, przez pojedyncze nuty, aż do fraz. Możliwe jest stosowanie jednostek różnego poziomu w ramach jednej implementacji. Fraza muzyczna która ma zostać zsyntetyzowana określana jest mianem celu. Synteza konkatenacyjna wykorzystuje algorytmy selekcji jednostek prowadzące do znalezienia takiej ich sekwencji, która będzie najlepiej dopasowana do celu. Dopasowanie jest oceniane w oparciu o różnego rodzaju deskryptory jednostek. Deskryptory są uzyskiwane bądź to na drodze analizy jednostek jako sygnałów, stanowiąc ich charakterystyki, bądź też na drodze przypisania. W drugim przypadku zawierają zwykle dane wyższego rzędu, często związane z informacją muzyczną. Wyselekcjonowane jednostki zwykle nie są jeszcze dokładnym odwzorowaniem założonego celu. Wymagają szeregu transformacji zanim zostaną przycięte i zmontowane w sygnał wyjściowy. Pomimo tego, że istnieją implementacje metody konkatenacyjnej pozwalające na grę w czasie rzeczywistym [6], metoda ta w swoim klasycznym ujęciu zakłada działanie na uprzednio przygotowanym materiale nutowym i w takiej formie, mogąc uwzględnić kontekst, wykazuje najwięcej zalet związanych z realistyczną interpretacją frazy muzycznej i reprodukcją naturalnych przejść między dźwiękami.

Jednocześnie jednak metoda konkatenacyjna na różnych etapach syntezy, od przygotowania korpusu, przez selekcję jednostek, aż po ich dopasowanie do celu, wymaga szeregu zaawansowanych algorytmów i technik przetwarzania sygnałów. Porównanie przebiegów wysokości w nagraniach opiera się m. in. na algorytmach dynamicznej transformacji skali czasu (*dynamic time warping* DTW) [7]– [10] lub ukrytych modelach Markowa [11]. Ciąg jednostek najlepiej odwzorowujących cel może być znajdowany algorytmem Viterbiego [12]. Część deskryptorów jest obliczana z wykorzystaniem metod wyszukiwania informacji muzycznej (*music information retrieval* MIR) [13], a ilość zgromadzonych infor-

macji wymaga stosowania relacyjnych bazach danych. Przed końcowym montażem jednostki są przekształcane z wykorzystaniem technik granularnych lub wokoderów [14]. Wymienione algorytmy i techniki mogą wprowadzać słyszalne zniekształcenia do złożonego sygnału muzycznego, a niejednokrotnie prowadzą do błędów wymagających ręcznych korekt.

Wysoka złożoność metody konkatenacyjnej sprawia trudności w realizacji jej implementacji o niezawodności porównywalnej z implementacjami metody samplingowej. W Akademii Muzycznej w Krakowie zrealizowano projekt finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki (projekt nr 2012/05/B/HS2/03972) mający na celu połączenie zalet obydwu metod. Opracowana w ramach projektu metoda wykorzystuje elementy metody konkatenacyjnej, jednak opiera się na ściśle określonym, kompletnym korpusie, eliminując dużą część algorytmów związanych z selekcją i transformacjami próbek.

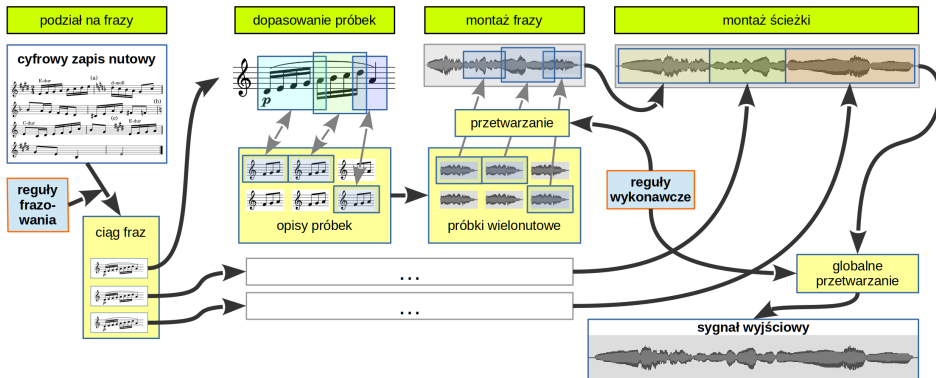
METODA AUTOMATYCZNEJ SYNTEZY FRAZ Z PRÓBEK WIELONUTOWYCH

Metoda automatycznej syntezy fraz z próbek wielonutowych (ASF) opracowana w Akademii Muzycznej w Krakowie [15] może być traktowana jako odmiana metody konkatenacyjnej. Operuje ona danymi wejściowymi w postaci zapisu nutowego oraz biblioteką próbek nagrań instrumentów, a sygnał wyjściowy jest tworzony poprzez wybór, przycięcie i montaż sekwencji próbek. W odróżnieniu jednak od typowego dla syntezy konkatenacyjnej wykorzystania nagrań utworów, a następnie ich segmentacji do jednostek, jednostki w ASF są próbkami przygotowanymi celowo na potrzeby syntezy. Stosowane są różne typy jednostek, zawierających pojedynczą wysokość oraz krótkie sekwencje wysokości. Korpus jest kompletny w tym znaczeniu, że posiada reprezentację połączenia każdej pary wysokości dostępnej dla danego instrumentu. Tym samym możliwe jest złożenie dowolnej sekwencji melodycznej bez konieczności transpozycji próbek, z zachowaniem naturalnych stanów przejściowych między dźwiękami. W obecnej formie korpus obejmuje próbki instrumentów dętych orkiestry symfonicznej i umożliwia generowanie płynnych fraz muzycznych.

Schemat metody ASF jest przedstawiony na rysunku 1. Wejściem jest cyfrowy zapis nutowy. Jest on wstępnie dzielony na frazy poprzez wyszukanie zdarzeń dzielących, takich jak łuki frazowe, pauzy, repetycje, czy duże skoki w melodii. Należy zaznaczyć, że termin „fraz” jest tutaj używany w znaczeniu wykonawczym i oznacza odcinek utworu grany bez przerwy, na jednym oddechu. Każda z wydzielonych fraz jest porównywana z zawartością korpusu w celu znalezienia najlepszej sekwencji próbek z której może zostać zbudowana. Na tym etapie dane są przechowywane, porównywane i przetwarzane w formie symbolicznej. W miejsce próbek wykorzystywana jest ich reprezentacja nutowa. Z reprezentacji korpusu budowane są frazy kandydujące, o sekwencji wysokości identycznej z sekwencją wysokości frazy docelowej. W tym celu mogą być wykorzystane zarówno całe próbki z korpusu, jak i ich odcinki, pozbawione jednej lub większej liczby początkowych lub końcowych nut. Próbki sąsiadujące ze sobą we frazie kandydującej muszą posiadać wspólną nutę, na której będą połączone. Spośród fraz kandydujących wybierana jest ta, która wymaga najmniejszej liczby połączeń między próbkami. Szczegóły algorytmów podziału frazy oraz dopasowania próbek są przedstawione we wcześniejszych pracach [16] [17].

Wyjściowa fraza jest tworzona poprzez cięcie i łączenie próbek z korpusu na wspólnych nutach. Jedynie pierwsza próbka frazy zawiera oryginalną fazę ataku. Ze względu na wy-

soką korelację wzajemną próbki są łączone techniką przenikania z uzgodnieniem fazy sygnału [15] [16]. Potencjalnie ciągły charakter zmian czasu trwania dźwięków sprawia, że korpus nie może przechowywać wszystkich możliwych temp oraz sekwencji rytmicznych. Przechowywane są jedynie nagrania wybranych temp głównych, z których docelowe tempo jest uzyskiwane przez odpowiedni dobór punktu łączenia próbek i ewentualne wstawienie dodatkowych odcinków. Gdy próbka zawiera więcej niż dwie wysokości, w razie potrzeby czas trwania każdej z nich może podlegać regulacji w niezależny sposób – poprzez wycięcie lub wstawienie dodatkowego fragmentu [15].



Rysunek 1. Schemat metody automatycznej syntezy fraz z próbek wielonutowych

Opisany sposób łączenia próbek zapewnia uzyskanie naturalnych przejść między dźwiękami w ramach frazy, natomiast element interpretacji muzycznej jest wprowadzany poprzez implementację reguł wykonawczych [18]. Reguły te mają wpływ na poziom dźwięku, rozmieszczenie poszczególnych nut w skali czasu, a także dobór próbek spośród kilku alternatyw. Reguły są aplikowane na etapie określania docelowych parametrów łączonej sekwencji próbek na podstawie kontekstu nutowego, z możliwością ręcznej korekty. Zakres reguł stosowanych w ASF oraz inne parametry związane z pracą syntezy zostały ustalone na podstawie wyników testów odsłuchowych z udziałem ekspertów [19].

KORPUS ASF

Struktura

Korpus ASF obejmuje próbki dźwiękowe w formacie PCM oraz towarzyszące im tekstowe pliki opisu, przechowywane w ściśle zdefiniowanej drzewiastej strukturze katalogów. Każdemu plikowi PCM towarzyszy dokładnie jeden plik opisu. Obydwa pliki posiadają wspólną nazwę, a różnią się rozszerzeniem: „wav” dla próbki i „dat” dla opisu. Określone informacje zawarte są zarówno w obydwu plikach, jak i zakodowane w ich nazwie oraz w położeniu na drzewie katalogów (tabela 1).

Tablica 1. Informacje zawarte w poszczególnych elementach korpusu

Zawarte informacje	
Położenie pliku	Instrument, typ próbki, podtyp próbki
Nazwa pliku	Pierwsza wysokość, dynamika, tempo, wariant
Plik opisu	Dane segmentacji próbki – granice nut i odcinków podtrzymania
Plik PCM	Próbka dźwiękowa – nagranie

Drzewo katalogów posiada trzy poziomy. Najwyższy z nich odpowiada określonemu instrumentowi. Kolejny oznacza jeden z trzech głównych typów próbek. Typ pierwszy obejmuje próbki o pojedynczej wysokości, drugi – pary wysokości, czyli interwały, a trzeci – tetrachordy, czyli odcinki skal. Najniższy poziom określa podtyp próbki, dokładnie definiując strukturę odległości pomiędzy jej dźwiękami. Poziom pośredni nie jest niezbędny, lecz został wprowadzony w celu łatwiejszej nawigacji w strukturze plików. Struktura podkatalogów odpowiadająca typom i podtypom powtarza się w gałęzi każdego instrumentu.

W ramach danego podtypu próbki różnią się bezwzględnyymi wysokościami (choć sama struktura interwałów jest identyczna) oraz cechami wykonawczymi: dynamiką i tempem. Niektóre najczęściej stosowane próbki zawierają po kilka różnych wariantów tego samego zestawu cech. Służy to uniknięciu słyszalnej powtarzalności poprzez ich wymienne stosowanie. Nazwa pliku zawiera więc również informację na temat wariantu próbki.

Łączenie próbek w sekwencję wymaga ich wcześniejszego cięcia w odpowiednich miejscach – zwykle w tzw. fazie podtrzymania, gdzie sygnał jest najbardziej zbliżony do stacjonarnego i operacja tego typu jest najmniej słyszalna. Dlatego w fazie przygotowania próbek dokonywana jest ich segmentacja, której celem jest określenie momentów wystąpienia zmian wysokości oraz granic faz podtrzymania. Te informacje, w formie indeksu próbki sygnału, są przechowywane w pliku opisu.

Nagrania są zapisane w plikach PCM o częstotliwości próbkowania 88,2 kHz. Na potrzeby prototypowej implementacji próbki zostały zarejestrowane z wykorzystaniem dwóch technik: A/B (mikrofonami DPA 4006) oraz X-Y (mikrofonami Schoeps 4V). Z tej przyczyny każde nagranie jest zawarte w czterech plikach, a użytkownik ma możliwość wyboru określonej techniki.

Zdefiniowana w opisany sposób struktura nie wymaga stosowania bazy danych do zarządzania zawartością korpusu, co znacząco upraszcza procedury selekcji jednostek. Określony zestaw cech ściśle definiuje położenie pliku w strukturze katalogów oraz jego nazwę. Wyszukiwanie jednostki o zadanych cechach sprowadza się wyłącznie do zbudowania ścieżki i nazwy pliku, w których zakodowane są wszystkie jej parametry.

Jednostki

Przy projektowaniu ASF założono, że jego podstawowym zadaniem będzie generowanie partii instrumentów dętych orkiestry symfonicznej w utworach okresu klasycyzmu i romantyzmu. Takie założenie pozwoliło określić typowe sekwencje oraz najczęściej wykorzystywane struktury. Zdecydowano się wykorzystać jednostki trzech typów: o jednej wysokości, pary wysokości (interwału) oraz sekwencji wysokości (tetrachordu).

Pierwszy typ (tabela 2) obejmuje różne rodzaje specjalnych technik wykonawczych, artykulacji i dynamiki. Długie dźwięki vibrato i non vibrato są wykorzystywane w operacji zmiany czasu trwania wartości w sekwencjach – ich odcinki są wstawiane do wydłużanych nut. Określenie „pojedyncza wysokość” odnosi się w przypadku jednostek tego typu do nuty głównej, a w skali chromatycznej – do pierwszej nuty.

Tablica 2. Lista jednostek o pojedynczej wysokości. Tam, gdzie nie zaznaczono, dynamika wynika z zawartości jednostki. Brak podanego tempa oznacza dźwięk możliwie najkrótszy albo najdłuższy – zależnie od kontekstu

Podtyp jednostki	Dynamika	Tempo	Komentarz
Krótkie <i>staccato</i>	<i>mp, f</i>		
Krótkie <i>staccato sforzato</i>			
Długie <i>sforzato</i>			
Długie <i>non vibrato</i>	<i>mp, f</i>		także do wydłużania innych wartości
Długie <i>vibrato</i>	<i>mp, f</i>		także do wydłużania innych wartości
Podwójne <i>staccato</i>	<i>mp, f</i>	120 BPM	cztery szesnastki
Pełna skala chromatyczna		szybkie	legato, wariant w górę i w dół
Długie <i>crescendo</i>		30 BPM	cała nuta
Długie <i>diminuendo</i>		30 BPM	cała nuta
Mordent półtonowy	<i>mp, f</i>		wariant górny i dolny
Mordent całotonowy	<i>mp, f</i>		wariant górny i dolny
<i>Acciaccatura</i> półtonowa	<i>mp, f</i>		wariant od dołu i od góry
<i>Acciaccatura</i> całotonowa	<i>mp, f</i>		wariant od dołu i od góry
Tryl półtonowy	<i>mp, f</i>		wariant od podstawowej i od górnej nuty
Tryl całotonowy	<i>mp, f</i>		wariant od podstawowej i od górnej nuty

Jednostki drugiego typu są nagraniami interwałów melodycznych, czyli sekwencji dwóch różnych wysokości (tabela 3). Ze względu na bardzo rzadkie występowanie większych skoków melodycznych we frazach oraz trudności wykonawcze związane z rejestrową zmianą barwy, interwały są ograniczone do oktawy czystej. Każda sekwencja jest wykonywana jako para ósemek legato w podanym tempie. Ze względu na częstsze występowanie w melodiach kroku sekundowego w stosunku do większych skoków [20], jednostki sekundowe (mała i wielka) o określonej dynamice, tempie i kierunku są nagrane w kilku wariantach, do wymiennego stosowania.

Trzeci typ jednostek określono jako tetrachordy (tabela 4). W ASF są to jednostki zawierające najdłuższe sekwencje wysokości. W muzyce tetrachord oznacza połowę skali siedmiostopniowej ze stopniem pierwszym powtórzonym z przeniesieniem o oktawę jako ósmy, a więc sekwencję czterech kolejnych wysokości w odległości sekundy. W ASF, aby umożliwić zązębianie się tetrachordów w dowolnie długą sekwencję gamową, dolny tetrachord został wydłużony do piątego stopnia skali, którym zaczyna się tetrachord górny. Nie wprowadza-

dzono tetrachordu molowego górnego doryckiego, ponieważ pokrywa się on z tetrachordem durowym. Pomimo tego, że pochod gamowy można zbudować wykorzystując jednostki interwałowe (sekundy), zdecydowano się wprowadzić jednostki tetrachordowe ze względu nieco odmienną interpretację przez wykonawców dłuższych sekwencji wznoszących bądź opadających [21], co może mieć niewielki, lecz słyszalny efekt w wyjściowej sekwencji.

Tablica 3. Lista jednostek tetrachordowych. Występują wszystkie zestawienia dynamik, temp i kierunków

Podtyp jednostki	Odległości kolejnych stopni, w półtonach	Dynamika	Tempo	Kierunek
Durowy dolny	2, 2, 1, 2	<i>mp</i>	60 BPM	w górę
Durowy górny	2, 2, 1	<i>f</i>	120 BPM	w dół
Molowy dolny	2, 1, 2, 2			
Molowy górny naturalny	1, 2, 2			
Molowy górny harmoniczny	1, 3, 1			

Tablica 4. Lista instrumentów w korpusie i zakresy zarejestrowanych wysokości dźwięków

Instrument	Skala wykorzystana w próbkach
Flet piccolo	d ² –c ⁵
Flet	c ¹ –c ⁴
Obój	b–g ³
Rożek angielski	e–c ³
Klarnet B	d–g ³
Fagot	B ₁ –dis ²
Waltornia	Fis–c ³
Trąbka B	e–b ²
Puzon basowy	B ₁ –b ¹
Tuba	D ₁ –gis ¹

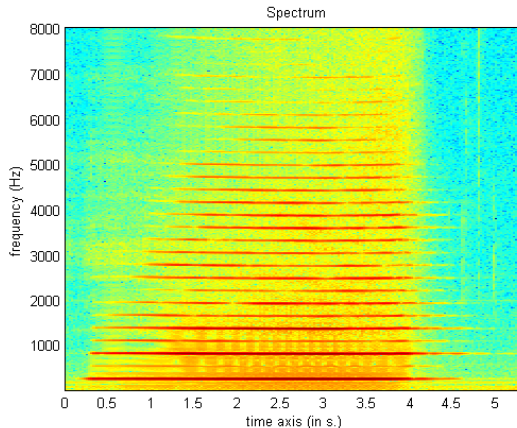
Instrumenty

ASF powstał jako syntezator grupy instrumentów dętych orkiestry symfonicznej. Oryginalny korpus obejmuje dziesięć instrumentów wymienionych w tabeli 4 i – ze względu na docelową syntezę partii z literatury orkiestrowej – ogranicza się do wysokości wykorzystywanych w grze orkiestrowej. Liczba jednostek rozpoczynających się od różnych wysokości w ramach określonego podtypu w gałęzi danego instrumentu jest określona skalą instrumentu oraz wewnętrzną strukturą wysokości w taki sposób, że nagrania pokrywają całą dostępną skalę instrumentu. W ten sposób, wykorzystując przede wszystkim jednostki interwałowe, a tam gdzie to możliwe jednostki tetrachordowe, ASF jest w stanie złożyć dowolną frazę

bez poddawania próbek transpozycji. Aktualna wersja korpusu zawiera po około 5000–6000 różnych próbek dla każdego z dziesięciu instrumentów.

Przykładowe próbki

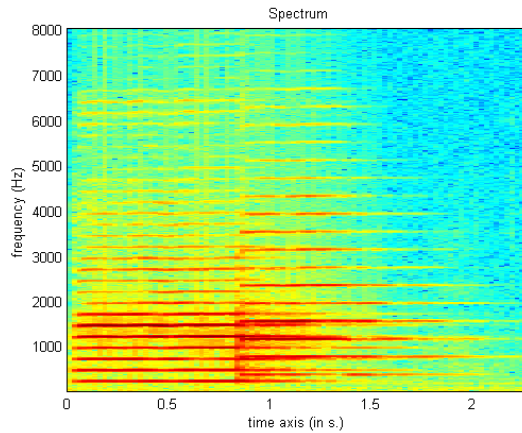
Rysunki 2–5 przedstawiają przykładowe spektrogramy próbek z korpusu. Rys. 2 ilustruje próbkę pierwszego typu graną przez klarnet, w której na pojedynczej wysokości (cis¹) realizowane jest crescendo. Rysunek 3 przedstawia próbkę drugiego typu, w której obój wykonuje interwał seksty małej w górę (wysokości h–g¹). Trzeci typ próbki jest przedstawiony na rysunku 4, gdzie obój wykonuje górny tetrachord skali molowej harmoniczej od dźwięku cis¹ w górę. Rysunki 5 i 6 przedstawiają tę samą próbkę drugiego typu graną przez fagot. Jest to interwał sekundy małej w górę od dźwięku Cis. Rysunek 5 przedstawia spektrogram, natomiast rysunek 6 wynik segmentacji jednostki z wykorzystaniem narzędzia *mirsegment* z pakietu MIR Toolbox [13].



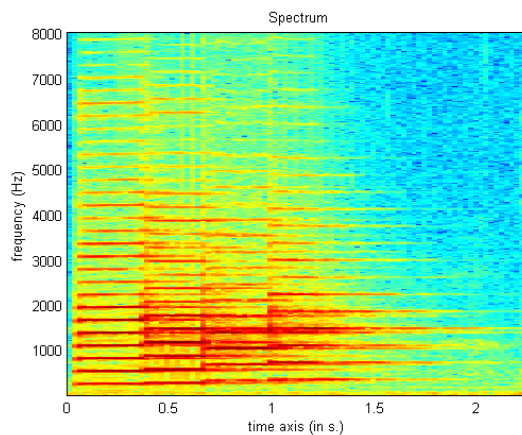
Rysunek 2. Próbką o pojedynczej wysokości – *crescendo* klarnetu na dźwięku cis¹

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono założenia, strukturę i zawartość korpusu automatycznego syntezy frazy wykorzystującego próbki wielonutowe. ASF jest rozwinięciem metody syntezy samplingowej o elementy metody konkatencyjnej. Podobnie jak synteza konkatencyjna generuje naturalne przejścia między dźwiękami, nie wymaga jednak stosowania wielu charakterystycznych dla niej algorytmów i technik – przede wszystkim transpozycji próbek, dynamicznej transformacji skali czasu, czy relacyjnych baz danych. W zamian ASF wykorzystuje odpowiednio przygotowany korpus, obejmujący kompletny zestaw próbek jedno i wielonutowych, pozwalających na realizację dowolnej sekwencji wysokości oraz oddzielnych nut.



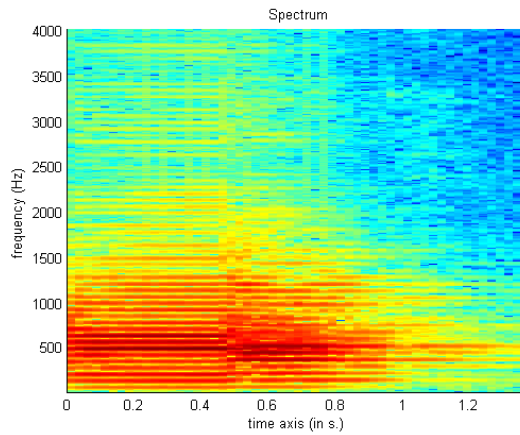
Rysunek 3. Próbkę z dwiema wysokościami – obój wykonujący interwał seksty małej w górę (wysokości $h-g^1$)



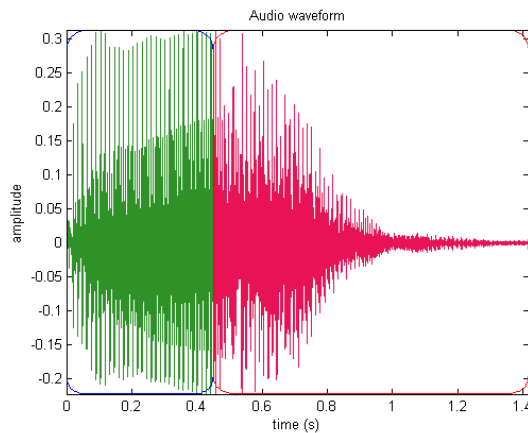
Rysunek 4. Próbkę z górnym molowym tetrachordem harmonicznym wykonanym na oboju od dźwięku cis^1

Zaprezentowany w artykule korpus umożliwia syntezę partii instrumentów dętych orkiestry symfonicznej. Stanowi on dobry punkt wyjścia do przyszłych prac w kierunku poszerzenia grupy syntetyzowanych instrumentów oraz dalszej poprawy realizmu generowanych sygnałów. Jednym z kierunków rozwoju powinno być dopracowanie techniki nagrań, aby ułatwić późniejszą automatyczną analizę i segmentację próbek. Równolegle można rozważyć rozszerzenie korpusu w zakresie reprezentowanych czasów trwania dźwięków z aktualnie stosowanych dwóch temp do trzech. W ten sposób możliwe będą mniejsze ingerencje w struk-

turę czasową próbek podczas montażu frazy, co przełoży się na mniejszą liczbę słyszalnych zniekształceń.



Rysunek 5. Próbką z dwiema wysokościami – fagot wykonujący interwał sekundy małej w górę od dźwięku Cis



Rysunek 6. Wynik segmentacji próbki z rysunku 5

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Howell: *The lost art of sampling*. Sound on Sound, 2005. Dokument on-line, <http://www.soundonsound.com/techniques/lost-art-sampling-part-1>, dostęp 2018.03.11
- [2] C. Roads: *The Computer Music Tutorial*. The MIT Press, 1996

- [3] M. Russ: *Sound Synthesis and Sampling*. Taylor & Francis Ltd, 3rd edition, 2008
- [4] G. Coleman: *Descriptor Control of Sound Transformations and Mosaicing Synthesis*. Praca doktorska, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, 2016
- [5] D. Schwarz: *Current research in concatenative sound synthesis*. W: Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC), 2005
- [6] D. Schwarz, R. Cahen, S. Britton: *Principles and applications of interactive corpus-based concatenative synthesis*. W: Proceedings of the Journées d'Informatique Musicale (JIM), str. 1–1, 2008
- [7] F. Soulez, X. Rodet, D. Schwarz: *Improving polyphonic and poly-instrumental music to score alignment*. W: Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR), Baltimore, 2003
- [8] H. Kaprykowsky, X. Rodet: *Musical alignment using globally optimal short-time dynamic time warping*. W: Proceedings of DAGA 2007: Fortschritte der Akustik, Stuttgart, str. 837–838, 2007
- [9] J. J. Carabias-Orti, F. J. Rodríguez-Serrano, P. Vera-Candeas, N. Ruiz-Reyes, F. J. Canadas-Quesada: *An audio to score alignment framework using spectral factorization and dynamic time warping*. W: Proceedings of the 16th International Society for Music Information Retrieval (ISMIR) Conference, str. 742–748, 2015
- [10] P. Alonso, R. Cortina, F. J. Rodríguez-Serrano, P. Vera-Candeas, M. Alonso-González, J. Ravnilla: *Parallel online time warping for real-time audio-to-score alignment in multi-core systems*. The Journal of Supercomputing, 73(1), str. 126–138, 2017
- [11] L. R. Rabiner: *A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition*. Proceedings of the IEEE, 77(2), str. 257–285, 1989
- [12] A. Viterbi: *Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm*. IEEE Transactions on Information Theory, 13(2), str. 260–269, 1967
- [13] O. Lartillot, P. Toivaiainen: *A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio*. W: Proceedings of the 10th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07), Bordeaux, France, 2007
- [14] R. Ramirez, A. Hazan, E. Maestre: *A tool for generating and explaining expressive music performances of monophonic jazz melodies*. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 15(4), str. 673–691, 2006
- [15] M. Pluta, L. J. Spalek, R. J. Delekta: *An Automatic Synthesis of Musical Phrases from Multi-Pitch Samples*. Archives of Acoustics, 42(2), str. 235–247, 2017
- [16] M. Pluta, R. J. Delekta: *Technique to Seamlessly Connect Sound Samples in Sampling Synthesis*. W: Progress of Acoustics 2015, K. Opieliński [Ed.], str. 271–282, Polskie Towarzystwo Akustyczne, Wrocław, 2015
- [17] M. Pluta, L. J. Spalek, R. J. Delekta: *A modified sampling synthesis for a realistic simulation of wind instruments – the design and implementation*. Journal of Applied Mathematics and Physics, 4(2), str. 215–220, 2016
- [18] R. J. Delekta, M. Pluta: *Implementacja reguł wykonawczych w syntezie dźwięku instrumentów dętych zmodyfikowaną metodą samplingową*. W: Proceedings of XVI International Symposium on Sound Engineering and Tonmeistering ISSET, str. 119–125, Warszawa, 2015
- [19] R. J. Delekta, L. J. Spalek, M. Pluta: *The impact of selected parameters of a modified sampling synthesis on the result of its auditory assessment*, Journal of Applied Mathematics and Physics, 4(2), str. 221–226, 2016
- [20] M. Costa, P. Fine, P. E. Ricci Bitti: *Interval Distributions, Mode, and Tonal Strength of Melodies as Predictors of Perceived Emotion*. Music Perception, 22(1), str. 1–14, 2004
- [21] A. Kirke, E. R. Miranda (Eds.): *Guide to Computing for Expressive Music Performance*. Springer-Verlag, London, 2013

Marcin STRZELECKI

**O MOŻLIWOŚCIACH ZASTOSOWANIA
TECHNIK WYSZUKIWANIA INFORMACJI
W STYLOMETRYCZNEJ ANALIZIE MUZYKI**

Akademia Muzyczna w Krakowie

WPROWADZENIE

Zagadnienie stylu muzycznego jest powszechnie dyskutowane w świecie muzyków. Jest częścią codziennej teorii i praktyki muzycznej. Jednocześnie jest różnorako definiowane (historycznie, geograficznie, gatunkowo, jako styl indywidualny kompozytora, itd). Z punktu widzenia psychologii muzyki, styl jest pewną uchwytą percepcyjnie i poznawczo jakością. Dzięki zaawansowanym technikom pozyskiwania danych muzycznych możliwe jest modelowanie wybranych aspektów procesów natury psychoakustycznej i psychologicznej prowadzących do powstania wrażenia określonego stylu lub stylistycznego podobieństwa. Ponadto, dostęp do dużych baz danych muzycznych umożliwia wyszukiwanie zbliżonych jakościowo „formuł muzycznych” pomiędzy różnymi stylami historycznymi i indywidualnymi, tzw. szkołami kompozytorskimi, oraz – szerzej – kulturami i subkulturami muzycznymi. Możliwości zastosowań tego typu technik są szerokie, od badań etnograficznych i historycznych, przez praktykę kompozytorską, włącznie z kompozycją interaktywną i algorytmiczną, do zastosowań komercyjnych w systemach rekomendacji muzycznych. Wydaje się jednak, że taka optymistyczna perspektywa badawcza jest możliwa do realizacji jedynie dzięki badaniom interdyscyplinarnym. W ramach nauk empirycznych i formalnych (współczesnej akustyki, psychologii i cybernetyki) możliwe jest wypracowanie niezwykle zaawansowanych i subtelnych modeli. Jednak to muzycy i muzykolodzy – dzięki edukacji i doświadczeniu szczególnie uwrażliwieni na kwestie stylu – stanowią będą ostateczną ich weryfikację. Stąd, już na etapie projektowania i realizacji owych modeli, warto podjąć taką interdyscyplinarną współpracę.

EKSPLORACJA DANYCH

Od drugiej połowy XX wieku jesteśmy jej świadkami, uczestnikami i współtwórcami tak zwanej rewolucji informatycznej. Zaawansowane metody przetwarzania informacji znajdują zastosowanie w każdej dziedzinie życia, tak w sferze przemysłowej i ekonomicznej, jak i kulturalnej, zarówno w nauce jak i sztuce. Gromadzone na ogromną skalę informacje wymagają nowych sposobów analizy. Wypracowano narzędzia informatyczne zdolne w sposób zautomatyzowany rozpoznawać wzorce i klasyfikować informacje zawarte w wielkich bazach da-

nych. Tak zwana „głęboka analiza danych” lub „eksploracja danych” (ang. *data mining*) jest dziedziną rozwijającą się dynamicznie i niezbędną na wielu polach działalności człowieka.

Główną postacią w jakiej istnieje dziś informacja jest postać cyfrowa – uporządkowany ciąg bitów utrwalony na nośnikach cyfrowych bądź przekazywany przez łącza internetowe. Metody pozyskiwania bardziej ogólnych informacji z danych cyfrowych są uzależnione specyfiką samej informacji. Inaczej analizować będziemy tekst a inaczej obraz i dźwięk. Na pewnym jednak poziomie abstrakcji metody te spotykają się na wspólnym polu, w którego centrum umieścić można na przykład skalowanie wielowymiarowe i analizę skupień. Metody te szczególnie dobrze sprawdzają się w analizie jakości, z którymi mamy nieustannie do czynienia w dziedzinach takich jak muzyka czy sztuki wizualne. Proces przejścia od informacji w postaci ciągu bitów do uogólnionych cech nadających się do interpretacji w postaci przestrzeni wielowymiarowej jest kluczowym etapem przetwarzania takiego rodzaju informacji. W sytuacji gdy mamy do czynienia z informacją, której ostateczną interpretacją będzie percypowana przez odbiorcę jakość estetyczna, przydatne okazują się metody modelowania pewnych wybranych aspektów systemu poznawczego człowieka. W ten sposób tworzymy uproszczony model, równoważny funkcjonalnie (w interesującym nas zakresie) z ludzkim systemem poznawczym.

Dane w postaci ciągu bitów nie stanowią dla użytkownika użytecznej informacji, póki nie zostaną – przez odpowiednie urządzenia i oprogramowanie – zinterpretowane i zaprezentowane jako tekst, obraz czy dźwięk. Taka postać informacji jest czytelna dla człowieka, który wyposażony w odpowiedni system poznawczy jest w stanie ją zrozumieć, wydobyć z niej znaczenia, czy przeżyć estetycznie. Jednak te z kolei znaczenia są trudne do reprezentowania w systemach informatycznych. Różne systemy przetwarzania informacji ewoluowały, lub zostały, zaprojektowane do różnych zadań. Dla maszyn liczących zadaniem łatwym jest zapamiętanie milionów liczb, zaś dla człowieka streszczenie kilkusetstronicowej powieści w kilku zdaniach. Chcąc wyłonić z muzyki czy dzieła wizualnego znaczenia takie, jakie postrzega człowiek, konieczne jest poznanie tego systemu poznawczego z punktu widzenia przetwarzania informacji.

Interpretacja informacji przez człowieka jest procesem złożonym. Zgodnie z podstawowymi tezami psychologii poznawczej¹ i w dużym uproszczeniu, zachodzi ona pomiędzy poziomami podstawowym, fizjologicznym systemu poznawczego (zmysły, procesy neuronalne, tzw. procesy oddolne, ang. *bottom-up*), a psychologicznym (procesy odgórne, ang. *top-down*). W ogólniejszym ujęciu, warunkowania biologiczne i kulturowospołeczne są niejako dwoma biegunami, między którymi dochodzi do złożonych procesów pośrednich, prowadzących do powstania jednostkowego systemu poznawczego, którym dysponuje każdy z nas. Istnienie pewnego biologicznego standardu oraz podobny kontekst kulturowo – społeczny, w którym kształtują się poszczególni ludzie stanowią przesłanki pozwalające dokonać generalizacji. Ludzie różnią się poznawczo nie aż tak bardzo, by nie było możliwe zauważenie w tym zakresie podobieństw czy typowych strategii. Istnieją oczywiście jednostkowe przypadki zupełnie nietypowych systemów poznawczych, będące bądź wynikiem dysfunkcji (np. niedowład słuchu, głuchota), bądź wprost przeciwnie – nadzwyczajnych zdolności (np. tak zwany „słuch absolutny”). Są to jednak przypadki wyjątkowe, nie stanowiące uposażenia

¹ por. „model cyklu percepcyjnego” (ang. *perceptual cycle model*, PCM), zaproponowany na przełomie lat 60 i 70 XX w. (Neisser 1976)

owego standardowego systemu poznawczego. Statystyczne uśrednienie cech kognitywnych jest uogólnieniem przydatnym tam, gdzie chodzi o analizę dużych zbiorów informacji.

ANALIZA I STYLOMETRIA MUZYCZNA

Muzyka jest dziedziną ludzkiej aktywności obecną we wszystkich znanych nam kulturach². Jednak w różnych kulturach, a także w różnych epokach, specyfika tej aktywności może być różna. Muzyka może postrzegana jako aktywność społeczna, artystyczna (w sensie europejskim), a także jako działalność naukowa. W średniowiecznej Europie, na przykład, muzyka była częścią nauk formalnych (obok geometrii, arytmetyki i algebry). W epoce Baroku refleksja o muzyce koncentrowała się na jej funkcji afektywnej. Z perspektywy romantycznej muzyka stanowiła wyraz indywidualnej osobowości twórczej i jako taka była ważną częścią XIX-wiecznej ideologii. W różnych epokach proporcje ważności między aspektami teoretycznym i praktycznym muzyki były różne. W wieku XX, w tak zwanej „muzyce współczesnej”, aspekt teoretyczny zyskał na znaczeniu. Stało się to głównie za sprawą przeformułowania istoty samej muzyki. Z dziedziny, w której centralną rolę stanowi intuicja, wyobrażenia i komunikacja emocjonalna z odbiorcą awansowała ona do dziedziny niemal naukowej, w której na pierwszy plan wysuwa się technika organizacji materiału muzycznego (wysokości dźwięku, wartości rytmicznych itp.). Strukturalne prawidłowości obecne w złożonych konstrukcjach wysokościowo-rytmicznych, będących rezultatem pracy kompozytorskiej, są dla „standardowego” słuchacza niedostępne na drodze czysto audytywnej percepcji. Tu ważną rolę zaczęła pełnić teoria muzyki, stając się koniecznym etapem pośredniczącym między kompozytorem a odbiorcą. W ramach teorii wypracowano nowe metody analizy mające dowieść istnienia regularności, zwłaszcza tych słuchowo nieuchwytnych. Istnienie takich regularności stanowiło bowiem warunek konieczny zaistnienia „wartości artystycznej”³ – dzieło strukturalnie koherentne stawiane było w hierarchii wartości wyżej niż dzieło takiej koherencji pozbawione. Powstają najróżniejsze metody analityczne a ranga samej analizy muzycznej rośnie.

Analiza muzyczna, jako poznanie całości przez rozbiór na elementy zdefiniowane w ramach jakiegoś systemu symboli⁴, jest procedurą redukcyjną: sprowadza złożony obiekt do wybranego, interesującego nas w danym momencie aspektu. Aspektów takich można wliczyć nieskończenie wiele. Ich zbiór jest wciąż powiększany przez nowych badaczy dostrzegających nowe problemy w starych dziełach. Może to być harmonia, melodia czy rytm. Ogólniej, może nim być semantyka, funkcja społeczna, wyraz emocjonalny czy zdolność wywoływania nastrojów. Aspekty takie są dostrzegalne i wyłaniane w zależności od tego, co w danym miejscu i czasie uważa się za istotę muzyki i co stanowi o jej wartości. Od czasu tak zwanej rewolucji poznawczej w nauce jednym z istotnych aspektów muzyki jest jej zawartość informacyjna: muzykę można traktować jako zbiór informacji przetwarzanych w systemie

² Różne formy uprawiania muzyki znajdują się na liście 200 kulturowych uniwersaliów opracowanej przez D. E. Browna (1991, 2000).

³ Metodą o takich właśnie założeniach była tak zwana „analiza schenkerowska”, której powstanie w sposób krytyczny opisuje N. Cook (2007).

⁴ Taką metodą jest na przykład powszechna w teorii muzyki analiza harmoniczna, sprowadzająca muzykę do ciągu symboli typu: D⁷ T vii ii⁷ S⁶ T

poznawczym. Informacje te tworzą hierarchię o różnych poziomach ogólności. Istnieją poziomy bardziej szczegółowe (struktura rytmiczna, melodia, harmonia) i ogólniejsze (ekspresja emocjonalna, nastrój).

Na najbardziej ogólnym poziomie umieścić między innymi zagadnienie stylu muzycznego. Jest on bowiem rezultatem unikalnej konfiguracji (współwystępowania) cech szczegółowych. Stylometria jest ważną dziedziną współczesnych badań nad kulturą. Pozwala dostrzec związki między zjawiskami w kulturze, a także wytyczyć trajektorię przemian w ramach poszczególnych zjawisk. Co ciekawe, pionierem współczesnej stylometrii jest Wincenty Lutosławski (stryj kompozytora – Witolda). Jego prace nad Dialogami Platona pozwoliły uporządkować je chronologicznie. Studia nad stylem muzycznym prowadzono z różnych perspektyw: historycznej, gatunkowej czy narodowej⁵. Styl rozważano jako cechę pewnego pokolenia kompozytorów czy cechę indywidualną poszczególnego kompozytora. W ramach twórczości jednego kompozytora wyróżniano ponadto pewne etapy przemian stylistycznych (np. styl wczesny, środkowy, późny). Przyjęcie perspektywy poznawczej przesuwaa akcent na odbiór muzyki przez słuchacza. W tym ujęciu styl stanowi uchwytą słuchowo cechę jakościową muzyki. W praktyce, z punktu widzenia słuchacza, zjawisko stylu ogniskuje się w pytaniu o podobieństwo muzyki.

Podobieństwo między utworami muzycznymi wydaje się zagadnieniem intuicyjnie zrozumiałym. Warto jednak zaznaczyć, że można je rozważać na różnych płaszczyznach. Na przykład harmonika dwóch utworów może być podobna, podczas gdy różnice melodyczne czy rytmiczne będą tak duże, że słuchacz nie zauważy podobieństwa. Dla przykładu, podobną strukturę harmoniczną, której prototypem XVII-wieczny jest *Kanon D–dur* (Johann Pachelbel), współdzielał utwory tak odmienne, jak *The passenger* (Iggy Pop), *Paparazzi* (Lady Gaga), *Can You Feel the Love Tonight* (Elton John), *Tears in Heaven* (Eric Clapton), hymn Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich (Aleksandra Aleksandrowa), a także hymn polskich stadionów *Polska! Biało–czerwoni!*. Podobieństwo jest więc zjawiskiem wielowarstwowym, dotyczącym w różnym stopniu różnych elementów dzieła muzycznego. Podobieństwo generalne między dwoma utworami jest silniej dostrzegalne jeśli zachodzi jednocześnie w większej ilości warstw.

Podobieństwo w muzyce będzie zjawiskiem jeszcze bardziej złożonym jeśli przyjmiemy perspektywę poza-europejską (czy spoza tzw. kręgu atlantyckiego). Praca dydaktyczna pozwoliła mi zetknąć się z interesującymi przypadkiem. Otóż, jak wiadomo, muzyka europejska notowana jest w postaci nut, które mogą być wykonane na różnych instrumentach. Na przykład cykl utworów J. S. Bacha *Kunst der fuge* nie został przeznaczony na żaden konkretny instrument czy zespół. Jest abstrakcyjną, dwuwymiarową konstrukcją wysokościowo–rytmiczną. Może być równie dobrze wykonany na akordeonie, fortepianie czy przez kwartet puzonów, a dla Europejczyka będzie to wciąż ten sam utwór: te same melodie, rytmy i harmonie. Z kolei studenci z Korei czy Chin wykonania *Kunst der fuge* na fortepianie i puzonach będą postrzegać muzykę niezbyt podobną. Dużo bardziej podobne natomiast, ich zdaniem, są *Kunst der fuge* wykonane na fortepianie i minimalistyczne, fortepianowe *Etiudy* Philippe’a Glass’a. O wrażeniu podobieństwa decyduje tu brzmienie instrumentu. Innymi słowy, jest to ten sam rodzaj muzyki – muzyki fortepianowej. Natomiast dla ucha europejskiego utwory Bacha i Glassa, ze względu na sposób kształtowania struktur dźwiękowych, różnią się ogromnie. Jest to ob-

⁵ Wśród klasycznych prac należy wymienić: Adler (1922/1929) i Meyer (1989)

serwacja własna, jednak wydaje się na tyle ciekawa, że domaga się systematycznego badania na polu psychologii muzyki. Należy jednak wziąć pod uwagę, że w przypadku studentów konserwatoriów muzycznych intensywne kształcenie w muzyce europejskiej stopniowo i konsekwentnie niweluje te różnice. Studenci zdają bowiem egzaminy z rozpoznawania określonej epoki czy stylu muzycznego, gdzie – zgodnie z tradycją europejską – większy nacisk położony jest na rozpoznanie struktur wysokościoworytmicznych, niż na aspekt brzmienia.

EKSPLORACJA DANYCH MUZYCZNYCH

Dziedzina eksploracji danych muzycznych z zastosowaniem narzędzi informatycznych rozwija się intensywnie od początku ery komputerów. Jednym z pierwszych znaczących eksperymentów był projekt Leonarda Issacsona i Lejarena Hillera zrealizowany na uniwersytecie w Illinois z zastosowaniem komputera ILLIAC. Rezultatem projektu była skomponowana w roku 1957 Illiac Suite. Autorzy zastosowali stochastyczne metody generowania struktur dźwiękowych w oparciu o statystyczną analizę istniejącej muzyki. Modele analizowanych utworów w postaci ciągów Markowa posłużyły za wzór dla generatorów probabilistycznych.

Od roku 2000 działa The International Society for Music Information Retrieval (ISMIR⁶), które organizuje doroczne sympozja poświęcone pozyskiwaniu danych muzycznych. W ramach wydarzenia organizowane są konkursy na systemy realizujące określone zadania (MIREX⁷). Wśród konkurencji, w których startują uczestnicy znajdujemy między innymi: *Audio US Pop Genre Classification*, *Audio Latin Genre Classification*, *Audio Music Mood Classification*, *Audio Classical Composer Identification*, *Audio Genre Classification*, i – co znamienne – *Audio Music Similarity and Retrieval*. Rozwój tej dziedziny badań stymulowany jest potrzebami rynkowymi. Narzędzia MIR znajdują zastosowanie między innymi w systemach rekomendacji wiodących portali muzycznych. Dla przykładu, Tristan Jehan, jeden z wiodących badaczy w tej dziedzinie, wywodzący się z MIT Media Lab i założyciel firmy Echo Nest, pełni obecnie funkcję Kierownika Badań (*Director of Research*) w firmie Spotify.

Co najmniej dwie istotne dla analizy stylometrycznej muzyki kwestie wyłaniają się z badań spod znaku MIR. Po pierwsze, metody opracowywane przez badaczy tego nurtu zorientowane są na to co w muzyce „słyszalne”. Po drugie, metody te muszą działać, to znaczy, muszą sprawdzać się w realnych warunkach. Można debatować nad taką czy inną definicją podobieństwa, nad taką czy inną koncepcją analizy. W teorii muzyki, można prowadzić badania nad kwestiami hipotetycznymi i abstrakcyjnymi, niemal bez obawy o „weryfikację”. Teoria muzyki jako taka (np. semiotyka muzyki, hermeneutyka) jest z natury postulatywna – proponuje pewien ogląd zjawisk muzycznych. Projektuje jej kulturową recepcję. Nie jest natomiast deskryptywna – nie opisuje stanu rzeczy. Tymczasem empirycznie zorientowane badania z zakresu eksploracji danych muzycznych znajdują ostateczną weryfikację, bądź fałsyfikację, w konfrontacji z oczekiwaniami użytkowników portali muzycznych. Konferencje ISMIR są pod tym względem znakomitym wyznacznikiem obecnego stanu dziedziny – prezentowane narzędzia ukazują na jakim poziomie zaawansowania znajduje się eksploracja danych muzycznych.

⁶ <http://www.ismir.net/> (dostęp: 25.02.2018)

⁷ <http://www.music-ir.org/> (dostęp: 25.02.2018)

Analiza sygnałów pozwala na pozyskiwanie różnorodnych informacji z dźwięku, zwłaszcza gdy sygnał odpowiada ustalonemu protokołowi. Od prostych sygnałów CTCSS stosowanych w telekomunikacji, przez analizę dźwiękowo zakodowanego alfabetu Morse'a, przesyłanie obrazów SSTV (*Slow Scan TeleVision*), steganografię audio, czy – znane z początków ery komputerów osobistych – programy komputerowe zapisane jako piski i trzaski na kasetach magnetofonowych. Są to jednak wszystko sygnały ściśle sformatowane według klucza znanego zarówno systemom nadającym jak i odbiorczym. Pozyskiwanie informacji z muzyki jest zadaniem zupełnie innej rangi. Nawet zadanie rozpoznawania mowy w systemach informatycznych zostało zrealizowane w sposób bardziej skuteczny.

Pewne pojęcie o skali trudności tego zadania daje przegląd konkurencji i wyników wspomnianego konkursu MIREX. Materiał muzyczny będący przedmiotem konkursu jest dostępny w ramach *Milion Song Dataset* (Bertin–Mahieux, i in. 2011) uniwersytetu stanowego w Columbii (USA). Plik objętości około 240 GB (po kompresji typu *deflate*), zawiera bazę cech psychoakustycznych i metadanych ekstrahowanych z każdego utworu. Ten „otagowany” materiał służy twórcom oprogramowania do trenowania swoich systemów analizy i klasyfikacji. Zadania, które systemy te mają do wykonania, obejmują między innymi rozpoznanie nastroju i gatunku muzyki. Działanie systemów porównywane jest z tagowaniem dokonanym przez wolontariuszy. W ostatniej edycji (2017) systemy rozpoznania nastroju (ang. *mood*) miały za zadanie przyporządkować muzykę do jednej z pięciu podstawowych kategorii (klastrow danych). W zadaniu rozpoznania kompozytora muzyki klasycznej systemy wybierały spośród jedenastu najbardziej znanych twórców. W przypadku rozpoznania gatunku wydzielono zaledwie 10 kategorii, oznaczonych jako: *baroque*, *blues*, *classical*, *country*, *edance*, *jazz*, *metal*, *raphiphop*, *rockroll*, *romantic*.

Sprowadzenie wielu subtelnych stanów emocjonalnych do pięciu kategorii, bądź całego bogactwa muzyki barokowej, romantycznej czy jazzu do jednej etykiety wydaje się wykształconemu muzykowi (i wrażliwemu słuchaczowi) nie do pomyślenia. Jednak obrazuje to jak elementarny poziom wyrafinowania wykazują wciąż algorytmy w porównaniu z słuchaczem. Tak zwani „osłuchani” odbiorcy muzyki są w stanie nie tylko precyzyjnie datować dzieła sprzed kilkuset lat z dokładnością do dziesięcioleci (np. francuska *ars subtilior* końca XIV w. i muzyka flamandzka początku XV wieku), lokować muzykę w pewnych kręgach geograficznych, a nawet miastach (np. szkoła rzymska i florencka początku XVII wieku), identyfikować style narodowe (niemiecki, włoski, francuski) nawet niezależnie od epoki, rozróżniać style pianistyczne w wykonawstwie muzyki romantycznej, a wręcz identyfikować style poszczególnych pianistów (np. Janusz Olejniczak, Krystian Zimmerman, Marta Argerich, i in.). Z tego względu muzyka, z całym bogactwem subtelnych informacji zawartych w dźwięku, wciąż pozostaje, i prawdopodobnie długo jeszcze będzie, probierzem skuteczności algorytmów typu MIR.

PRZYKŁAD ANALIZY

Zarówno zadania przed którymi stoją twórcy algorytmów analizy muzyki jak i sam materiał analityczny skategoryzowany i opracowany jest z pewnego określonego punktu widzenia. Jest to zwykle perspektywa europocentryczna, gdzie pod pojęciem muzyki rozumie się strukturę dźwiękową, zawierające pewne (pozornie) oczywiste elementy: rytm, melodię, harmonię,

wreszcie określoną formę rysującą się w czasie trwania dzieła. Domyślne założenie istnienia takich elementów pozwala uprościć algorytmy przez zawężenie liczby kategorii. Innymi słowy, do analizowanych utworów przykładana jest podobna miara. W poznawczo zorientowanej analizie muzyki poziom taki nazywa się poziomem symbolicznym (Leman, 1989): wielość informacji sprowadzana jest do symboli zaczerpniętych z określonego słownika, takich jak na przykład: „tonacja”, „funkcja harmoniczna”, „metrum”. Redukcja złożonego fenomenu muzycznego do zbioru symboli pozwala łatwiej dokonywać porównań, znajdować i szacować podobieństwa. Strategia ta sprawdza się tym lepiej, im bardziej badany materiał jest zawężony do pewnego kręgu kulturowego. Modelowanie percepcji określonych elementów muzycznych może odzwierciedlać procesy zachodzące poznawcze będące udziałem słuchaczy kompetentnych w ramach danej kultury muzycznej. Co jednak, jeśli analizowanym materiałem jest muzyka innych kultur, gdzie wiodące kategorie poznawcze mogą być inne? Przykładem jest tradycyjna muzyka etniczna kultur świata.

W pilotażowym badaniu⁸ wykorzystano nagrania z serii *UNESCO Collection of Traditional Music*, zawierającej 127 albumów, wydanych między 1961 a 2003 rokiem. Baza ta pokrywa dużą część mapy świata (107 regionów), jest dobrze udokumentowana, a nad jej opracowaniem czuwał znany etnomuzykolog Alain Daniélou. W przypadku materiału o takiej rozpiętości stylistycznej nie sposób założyć istnienia jakiegokolwiek wspólnego poziomu symbolicznego, czyli kategorii poznawczych wyższego – kulturowo uwarunkowanego – poziomu (harmonia, metrum itd). Możliwa jest jedynie analiza cech sub-symbolicznych, czyli psychoakustycznych czynników jakości muzycznych⁹. Do rozstrzygnięcia pozostaje także kwestia skali czasu analizowanych fragmentów. Autorzy wyróżniają tu zwykle różne poziomy¹⁰: poziom ramki (arbitralnie ustalonej długości odcinek czasu), poziom bloku (fragment będący wynikiem automatycznej segmentacji w oparciu próg zmienności wybranych parametrów), poziom utworu (cały utwór). W ogromnej większości przypadków tak zwanych nagrań terenowych zarejestrowany fragment muzyki jest stylistycznie stacjonarny. Etnomuzykologowie niejako pobierają próbki muzyki, a nie całe „dzieła” w rozumieniu europejskim. Stąd, za skalę analizy przyjęto całą ścieżkę dźwiękową – analogicznie do wspomnianego wyżej „poziomu utworu”. Dla zmniejszenia wymagań obliczeniowych i pamięciowych zdecydowano się na wycięcie z każdego utworu dwóch pięciosekundowych fragmentów, w 1/3 i 2/3 trwania ścieżki dźwiękowej. Otrzymano w ten sposób około 12,5 tys próbek dźwiękowych.

Do ekstrakcji cech wykorzystano otwartą bibliotekę *ESSENTIA*¹¹, prezentowaną przez jej autorów podczas ISMIR w roku 2013 (Bogdanov i in., 2013). Wektor 60 cech zawierał m. in.: podstawowe statystyczne momenty spektralne, współczynniki melcepstralne, informację o tzw. szorstkości (ang. *roughness*) związanej ze zjawiskiem dysonansu sensorycznego, harmoniczność spektrum (mierzoną jako odwrotność entropii Shanonna), oraz estymaty rytmiczne, jak: autokorelacja sygnału, szacowana długość wzorca czasowego (tempo) i jedną z interesujących estymat pakietu *essentia* – *danceability* („tańcowalność”). Prosta redukcja

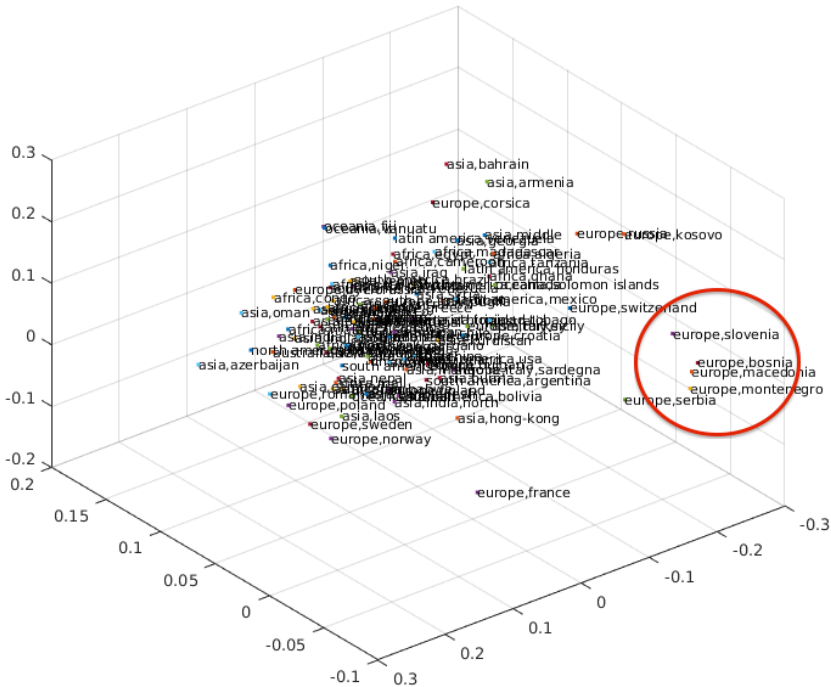
⁸ Marcin Strzelecki, *Stylometric Analysis of Music in Search of Cross-cultural Similarities*. Badanie i jego wyniki szczegółowo zaprezentowano podczas *9th European Music Analysis Conference* w Strasburgu, 28.06–1.07.2017 r. Publikacja w przygotowaniu. Abstrakt dostępny w materiałach konferencyjnych: <http://euromac2017.unistra.fr/en/proceedings/> (dostęp: 25.02.2018), prezentacja dostępna na stronie autora: <http://marcinstrzelecki.pl/docs/online/Strzelecki2017CrossculturalStylometryPresentation.pdf>

⁹ Termin zaproponowany w pracy: Strzelecki, 2014

¹⁰ por. Eghbal-Zadeh i. in. 2015, Seyerlehner i. in. 2010

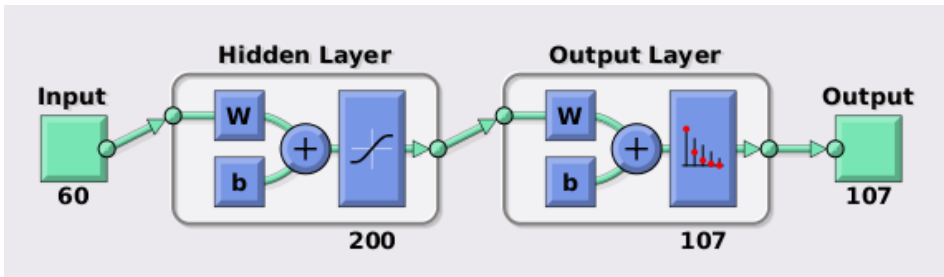
¹¹ <http://essentia.upf.edu> (dostęp 25.02.2018)

wymiarów (PCA), uśrednienie danych z poszczególnych regionów i trójwymiarowa wizualizacja punktów danych nie pozwoliła zauważyć szczególnie wyraźnych skupisk (z wyjątkiem wokalne muzyki bałkańskiej, rys. 1). W kolejnym etapie analizy obrano inną strategię.

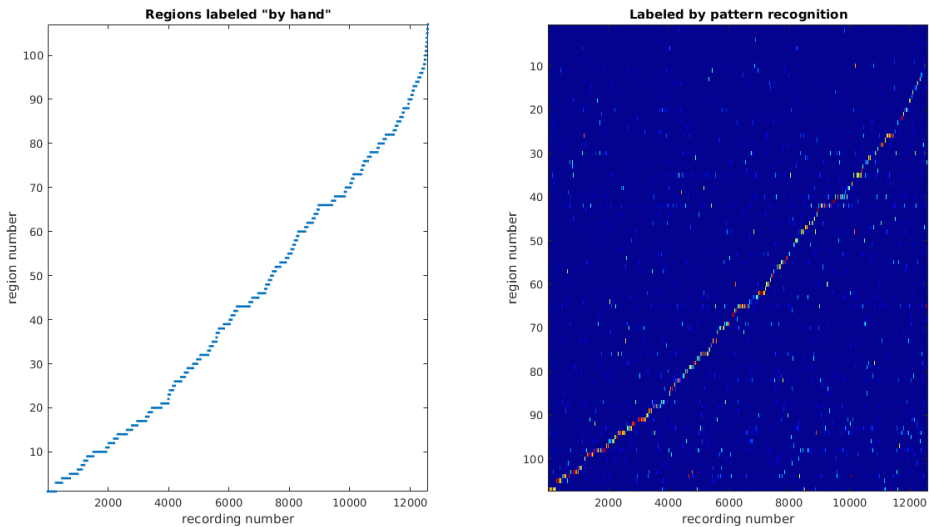


Rysunek 1. Trójwymiarowa reprezentacja uśrednionych danych z regionów geograficznych. Z prawej strony zaznaczono przykładowo bliskie sąsiedztwo punktów reprezentujących kraje bałkańskie

Poszukiwanie podobieństw w etnicznej muzyce tradycyjnej można postrzegać jako odwrotność zadania, przed którym stoi student etnomuzykologii podczas egzaminów z rozpoznawania muzyki różnych regionów świata. Tutaj rozpoznający ma jednoznacznie określić źródła słuchanej muzyki, zminimalizować prawdopodobieństwo pomyłki. Istnienie muzyk o podobnych cechach percepcyjnych zwiększa zaś takie prawdopodobieństwo. Na użytek badania pilotażowego, zoperacjonalizowano termin „podobieństwo muzyczne” jako prawdopodobieństwo popełnienia pomyłki przez system rozpoznający. Jako model takiego systemu zastosowano klasyfikator neuronalny (rys. 2), którego zadaniem było oznaczenie zadanej próbki etykietą jednego ze 107 regionów geograficznych reprezentowanych w bazie (107 neuronów wyjściowych, aktywowanych w różnym stopniu przez wzorce wejściowe). Podczas nadzorowanego uczenia sieci wykorzystano 10% analizowanych próbek. Wyniki klasyfikacji neuronalnej nie dorównują klasyfikacji „ręcznej” (rys. 3), lecz właśnie to było celem użycia takiego narzędzia.

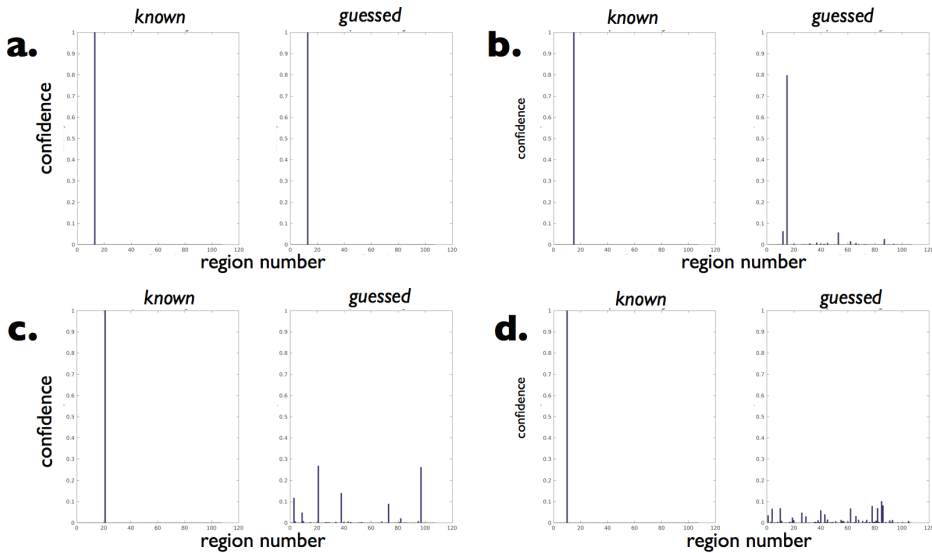


Rysunek 2. Schemat sieci neuronowej użytej do klasyfikacji ścieżek dźwiękowych



Rysunek 3. Porównanie wyników klasyfikacji ręcznej i automatycznej

Analiza poszczególnych próbek bazy pozwoliła zauważyć, że niektóre z nich klasyfikowane są wyraźnie i jednoznacznie, inne zaś ambiwalentnie, inne wręcz wcale. W ten sposób wyłoniono z bazy fragmenty, zbliżone między sobą ze względu na „prawdopodobieństwo pomyłki” (rys. 4). Wyniki analizy pozwoliły zauważyć istnienie obecnych w różnych, nie-rzadko odległych kulturach muzycznych, podobnych form uprawiania muzyki. Na uwagę zasługuje wszechobecność muzyki z użyciem instrumentów piszczalkowych (fletów różnego rodzaju), podobnych struktur rytmicznych, oraz podobnych sposobów użycia głosu ludzkiego (tzw. emisji głosu).



Rysunek 4. Przyporządkowanie zadanych próbek muzycznych do regionu geograficznego (*known* – oznaczenie na podstawie opisu wydawcy, *guessed* – oznaczenie przez sieć neuronową), a) klasyfikacja jednoznaczna, b) klasyfikacja o cechach ambiwalencji, c) klasyfikacja ambiwalentna (najbardziej interesująca), d) brak wyraźnej klasyfikacji

PODSUMOWANIE

Celem opisanego badania było wstępne oszacowanie możliwości zastosowania metod eksploracji danych w analizie stylometrycznej muzyki. W ogólnej interpretacji wyników postawić można tezę, iż podstawę dla istnienia międzykulturowych podobieństw stanowi wspólny ludziom fundament biologiczny, w postaci podobnych mechanizmów percepcji dźwięku (psychoakustyka) i jego przetwarzania na dalszych etapach procesów poznawczych (mechanizmy neuronalne). Rozwój podobnych technik analizy prowadzić może w przyszłości do zarysowania ogólnej topologii muzyki etnicznej, typowych form uprawiania muzyki wykształconych w różnych częściach świata.

Warto zaznaczyć, że opisana metoda analizy została zaprojektowana ze względu na określony cel i jako taka nie nosi znamion narzędzia uniwersalnego, wszechstronnego. Na jej kształcie zaważyło postawienie określonego problemu badawczego. Stąd, w dalszym rozwoju tego typu badań warto uwzględnić interdyscyplinarną współpracę pomiędzy muzykologami a specjalistami z zakresu akustyki, psychoakustyki i technologii przetwarzania informacji. Pierwsi potrafią formułować problemy, stawiać ważne dla przedmiotu swych badań pytania. Odpowiedzi zaś dostarczyć mogą inżynierowie zaawansowani w eksploracji danych. Wydaje się, że rozwój takiej technologii może być stymulowany realnymi problemami, na przykład natury muzycznej. Postawienie inżynierów przed określonymi, nowymi i interesującymi zadaniami inspirowane do poszukiwania nowych rozwiązań technicznych. Z drugiej strony, świadomość muzykologów co do możliwości współczesnej technologii analizy dźwięku odważniej

pozwała stawiać kolejne pytania. Tego typu sprzężenie zwrotne, pomiędzy użytkownikami technologii (w tym wypadku analitykami muzyki) a jej dostawcami (inżynierami) jest zjawiskiem powszechnym na różnych polach współczesnej nauki i sztuki. Z pewnością prowadzi do rozwoju obu dziedzin.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adler, G.(1911/1929, reprint 2013) *Der Stil in der Musik*, Europäischer Musikverlag
- [2] Bertin–Mahieux, T., Ellis, D.P.W., Whitman, B., Lamere, P. (2011) *The Million Song Dataset*, w: Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR'2011)
- [3] Bogdanov, D., Wack N., Gómez E., Gulati S., Herrera P., Mayor O., et al. (2013). *ESSENTIA: an Audio Analysis Library for Music Information Retrieval*, w: Proceedings of the ISMIR'13, International Society for Music Information Retrieval Conference, s. 493-498
- [4] Brown, D.E. (1991) *Human Universals*. Nowy Jork: McGraw-Hill
- [5] Brown, D.E. (2000) *Human universals and their implications*, Being humans: Anthropological universality and particularity in transdisciplinary perspectives, red. N. Roughley, Nowy Jork: Walter de Gruyter
- [6] Cook, N. (2007), *The Schenker Project*, Oxford University Press
- [7] Eghbal–Zadeh, H., Lehner, B., Schedl, M., Widmer, G. (2015), *I-VECTORS for timbre-based music similarity and music artist classification*, Proceedings of the ISMIR'15, International Society for Music Information Retrieval Conference
- [8] Leman, M. (1989), *Symbolic and subsymbolic information processing in models of musical communication and cognition*, Journal of New Music Research, 18(1-2):141-160
- [9] Meyer, L.B. (1989), *Style and Music. Theory, History, and Ideology*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia
- [10] Neisser, U. (1976), *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*, Nowy Jork: Freeman
- [11] Klaus Seyerlehner, Gerhard Widmer, Tim Pohle (2010), *Fusing block-level features for music similarity estimation*, Proceedings of the 13th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-10), Graz, Austria , September 6–10, 2010
- [12] Strzelecki, M. (2014), *Relacje pomiędzy harmoniką a brzmieniem w muzyce XX wieku*, Teza doktorska, Akademia Muzyczna w Krakowie (publikacja w przygotowaniu w wydawnictwie akademickim).

Część III

Inżynieria biomedyczna

Olga DOUBROVINA *, *Ryszard TYMKIEWICZ***,
*Hanna PIOTRZKOWSKA-WRÓBLEWSKA*** , *Barbara GAMBIN***

**LINKING OF STRUCTURAL PARAMETERS
TO PROPERTIES OF ULTRASOUND BACKSCATTERED SIGNALS
BY THE THREADS PHANTOMS STUDY**

* *Belarussian State University, Minsk, Belarus,*
** *Polish Academy of Sciences,*
Institute of Fundamental Technological Research
e-mail: doubrovinaOV@bsu.by

INTRODUCTION

The soft tissue structure possess the multi-scale anatomical inhomogeneities. There are many types of tissues, where one can recognize at least two main scales: millimeter scale and micrometer scale which are the basic scattering structures for an ultrasound wave of the diagnostic frequency range penetrating the tissue. The millimeter scale is due to the existence of quasi-periodic blocks of cells forming semi-regular lobules e.g.in the anatomical units of the liver tissue, and the micrometer scale is formed with many small scatterers like cell walls or large cell nuclei. The breaking of anatomical structure is often caused by the beginning of the cancer process. It is very important and unresolved problem to find any tools to recognize this two type of scattering. Quantitative ultrasound (QUS) provides quantitative data in an attempt to overcome the high subjectivity of ultrasonography. Scatterers spacings (SS) are one of the parameters investigated. The wavelet transform techniques has been considered as the most proper way to search of signal singularities. In the [3] was to evaluate the effect of signal noise level and scatterers positions variability (jitter) on periodicity characterization using continuous wavelet transform (CWT). US signals were simulated with mean scatterer spacings (MSS) of 1.0, 0.99, 0.9, 0.8, 0.7, and 0.6 mm as well as with several jitters (variation in the expected scatterer position from 0 to 30%),and noise as defined by Ad, percentage ratio between the average echo amplitude from diffuse to regular scatterers from 1 to 50. The identification of the modulus maxima sequence was done after applying CWT. SS distributions were computed for the estimations of MSS average and standard deviation (in mm), variation coefficient (VC), average histogram mode (in mm) and accuracy error in %. In the paper [3], there is also a comprehensive discussion of other spectral methods applied to modelling the regularity or pseudo-regularity of real tissue structure. Usefulness of wavelet transformation in RF backscattered signal to scattering medium characterization was already proved in [7] and [8]. But in the papers the only diffusive scattering was studied. To confirm the utility of the wavelet method for structural regularity recognition in backscattered ultrasound signals we decided that a series of phantom experiments should be performed to clarify the meaning of all applied procedures.

MATERIALS AND METHODS

Experiment 1. At the beginning the periodic phantom structure as a 3D thread structure in the form of nylon formed a lattice 6×7 threads were prepared. The threads with a thickness of 0.1 mm placed at regular periodic structure with distances of 1 mm was immersed in the water. The B-mode of this phantom is shown in the fig. 1 on the right. This threads structure was used as a model to analyze the properties of ultrasound signal echoes registered with the use of different transducers, both focusing and plane ones. The range of carried frequencies for used transducers were of 1MHz to 20 MHz. The measurements were made with 20–MHz SonixTouch–Research ultrasound scanner (Analogic Corporation, Peabody, MA, USA) with a 20–MHz linear probe.

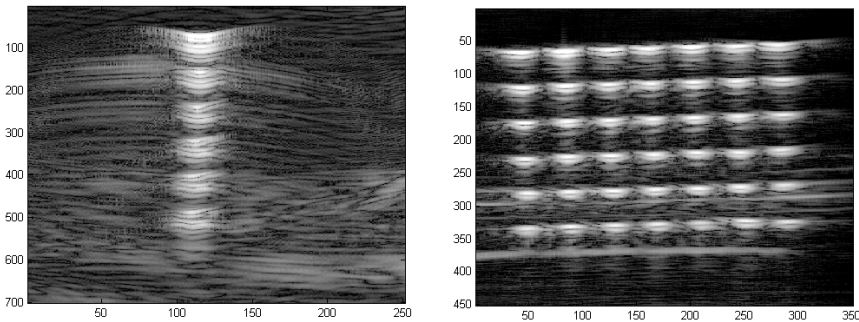


Figure 1. B–modes of example signals a)experiment 2, b) experiment 1

Table 1. Characteristics of the experiment

Characteristics	Value
Main frequency	15MHz
Wavelength	0.01mm
Sampling distance	0.02mm
Depth	260mm

Measurements of a transmitted single ultrasound pulse by the transmitter, Panametrics Computer Controlled Pulser/Receiver Model 5900PR, were performed on 5 mm and 10 mm depths from the transducer face with the use of a high quality hydrophone. The following results were obtained:

1. the measured carried frequency is 16.6 MHz at both depths, approximately it can be considered as equal to 17 MHz
2. the frequency band, calculated for 6 dB of energy averaged from two depths, is approximately 11 -20 MHz

3. the wavelength for the carried frequency is c/a 0.01 mm and is determined from the duration of 1 period = 60 ns and SOS (speed of sound) in the water.
4. the pulse length is estimated as $5 \times 0.01=0.05$ mm.

Experiment 2. The threads structure with nylon threads of 0.35 mm thickness and located in distances of 1.5 mm, were immersed in water. Additionally oil and starch gel, instead of water were used to study the influence of the background medium properties on the ultrasound backscattering signals from the same structure. In what follows we did not analyze this influence. It will be done in the near future.

Having measured the pulse properties and applied the wavelet analysis to the registered signals the identification of the threads positions in space, namely MSS (Mean Scatterer Spacing) could be calculated. The example of the B-mode of this structure in the water is shown in the fig. 1, to the left.

Distance between reflector and transducer was equal to c/a 7 cm. The precise distance can be calculated from the images of pulses registered by the oscilloscope (Digital Storage Oscilloscope DS09104A Agilent Technologies), Fig. 2.



Figure 2. Example of the impulse

Limitation of the wave frequencies are necessary to application of the band-pass filtering of RF signals to exclude effects of external noise, i.e. the "electronic noise" which is not connected with the scattering structure of the medium. The frequency range is bounded from above:

- principally by the frequency $f^{above} = \frac{1}{2} \cdot (\text{samplingfrequency})$
- in practise should be equal to the upper bound of the bandwidth of the transducer calculated from measured pulses emitted from different transducers,

and from below:

- theoretically calculated as equal to

$$\frac{1}{\text{time duration of signal}} = \frac{1}{\text{sampling distance in time scale} * \text{number of samples}},$$

- practically should also be limited by the lower bound of the the transducer bandwidth calculated from measured pulses emitted from different transducers.

Tab. 2 summarizes the different transducer characteristics.

Table 2. Characteristics of transducers

Name of transducer	Carried frequency, MHz	Type	Distance, from transducer to focus, cm	Registered pulse attenuator turn on, dB	Diameter of transducer face, mm
6F	6	focusing	6.5	10	10
3.5F	3.5	focusing	6.5	10	15
6P	6	plain	—	20	12
1P	1	plain	—	-10	25

The following figures represent the examples of corresponding backscattered signals.

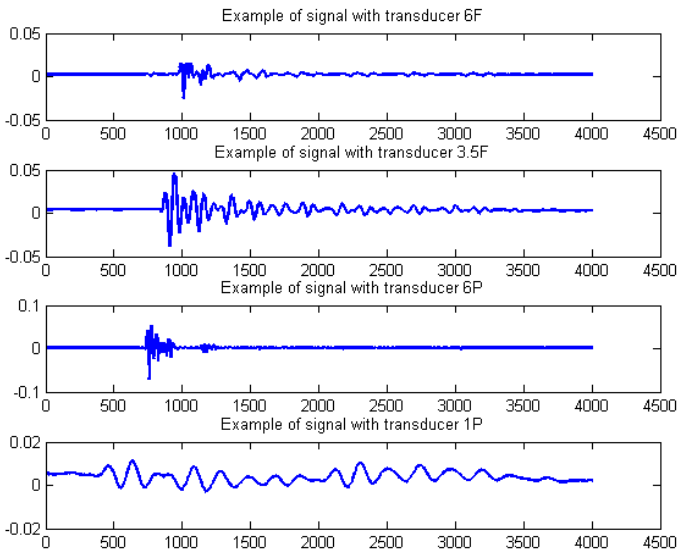


Figure 3. Examples of backscattered signals

WAVELET ANALYSIS

The idea of the application of wavelet transforms in signal processing is widely used as this method gives more information of the signal behaviour and allows to figure the most characteristic features, to have localization in time and frequency domain simultaneously, to see the changes in time [1].

This technique in general concludes is the signal's representation consists of two parts, the first one is rude and is called approximation, the second is more refined, it is called detail. These processes are iterative and they stop when the required accuracy is reached. The described method supposed the usage of two required functions ψ and φ for the wavelet decomposition and following signal reconstruction.

The wavelet function $\psi(x)$ such that $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$ generates the detail coefficients. Its sense is to describe the signal. It also composes the basis by time shift with $\psi(t-b)$ the real parameter b and scaling $\frac{1}{a} \psi\left(\frac{t}{a}\right)$ with the positive real parameter a . The parameter b gives the wavelet position and a is the scale parameter in time. In the frequency domain the small values of a represent the high frequencies, the large values — the low frequencies. Scaling function $\varphi(x)$ such that $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = 1$ generates the approximation coefficients.

A function $\psi(x)$ may be considered as a wavelet function if $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty$ and $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$, where $\hat{\psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \exp^{-i2\pi\omega t} dt$ is a Fourier transform of the function $\psi(x)$. The constant C_ψ is often used as a normalizing coefficient for the integral and discrete wavelet transforms. The continuous wavelet transform for the function $f(x)$, that is integrable with its square may be represented by means of wavelet function $W_\psi(a, b) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$, where $a \in (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$ is a scale parameter and $b \in (0, \infty)$ is a shift parameter, $\bar{\psi}$ is a complex conjugate to the function ψ we will consider the second equality. There is the inverse wavelet transform defined by equation

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} W_\psi(a, b) \bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2}. \quad (1)$$

In the case of the discrete signal the corresponding discrete wavelet transform is used. The discretization algorithm is rather standard (see e.g. [2]). For the scale coefficient a it is used the dyadic discretization scale $a_j = 2^{-j}$, where $j \in \mathbb{Z}$ is a scale index. The coefficient b is discretized linearly so that $b_{j,i} = i2^{-j}$, $i \in \mathbb{N}$.

The formula for discrete wavelets in general case may be written as follows

$$\psi_{j,i}(x) = \frac{1}{\sqrt{a_j}} \psi\left(\frac{x-b_{ji}}{a_j}\right) \quad (2)$$

and the discrete decomposition $w_{ji} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi_{ji}(x)} dx$. The corresponding discrete reconstruction formula is $f(x) = C \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_{ji} \psi_{ji}(x) + R(x)$. Here C is a constant and $R(x)$ is a residual which depends on the choice of wavelet.

The construction of orthogonal wavelet bases is on the concept of multiresolution analysis (MRA). In this case special families of wavelets ψ_{ji} such that $\langle \psi_{ji}, \psi_{lk} \rangle = \delta_{jl} \delta_{ik}$, where $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denotes a scalar product and δ is the Kronecker symbol, are considered. This means that the wavelets ψ_{ij} are orthogonal with respect to their shifts by discrete steps b_j and their scaled versions by discrete steps a_j . In this case the formula of inverse transform is exact with $C = 1$ and $R(x) = 0$.

The idea of the application of discrete orthogonal wavelet transform is to consider the approximations f_j of the signal $f(x)$ at different scales j . This allows to pass from the approximation f_j to the higher resolution approximation f_{j+1} and to encode the difference between the approximation into the wavelets. The procedure of MRA is described in [2]. The filter is constructed with the help of scaling functions which are paired to each wavelet functions.

The scaling function $\phi(x)$ is normalized, the set of functions ψ_{jk} consists of scaled and dilated modifications of the function $\phi_{ji}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - i)$ and $\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) dx = 1$. The basis

$\phi_{ji} \in L_2(\mathbb{R})$ is orthonormal at a given scale j with respect to its translations by the step $\frac{i}{2^j}$: $\langle \phi_{ij}, \phi_{jk} \rangle = \delta_{jk}$.

The corresponding wavelet function ψ may be written in the form

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j x - k). \quad (3)$$

For any chosen wavelet family, i.e. for the known functions $\phi(x)$ and $\psi(x)$, the coefficients h_k and g_k can be found and the approximation and reconstruction for the given function f can be obtained [2].

Denoting $\bar{f}_{ji} = \langle f, \phi_{ji} \rangle$, $\tilde{f}_{ji} = \langle f, \psi_{ji} \rangle$ the approximation formula for the level N with respect to the scale k is obtained $f_k(x) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \bar{f}_{ki} \phi_{ki}(x) + \sum_{j=k}^N \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \tilde{f}_{ji} \psi_{ji}(x)$.

In discrete case any function that is integrable with its square may be presented in a form

$$f(x) = \sum_k a_{j_n} \phi_{j_n,k} + \sum_{j \geq j_n} d_{j_n,k} \psi_{j_n,k} \quad (4)$$

with wavelet functions $\psi_{j,k}$ and scaling functions $\phi_{j,k}$. Amplitude coefficients a_k and detail coefficients d_k are calculated. Formula (4) represents the wavelet decomposition of $f(x)$ up to the level j_n .

Decomposition levels at 0-level represents the signal itself, the next show the decomposition. The more level number gives the less exact signal but there is the possibility of filtering, denoising and compression.

In our investigation there is applied the Daubechies wavelet family, namely, Daubechies 6 wavelets as orthonormal wavelets (cf. [6]) with compact support. These wavelet and scaling functions are frequently used for analyzing real signals. They have no analytic representation, they are constructed recurrently. The Daubechies wavelets of order p satisfy the following

properties: they are orthogonal, have compact support, there is no symmetry for $p > 1$, they have p vanishing moments, the filter length is equal to $2p$.

The choice of the analyzing wavelet was based on the shape of the form of the impulse which was used in the described above experiment. In the Fig. 4 on the left-hand side there are presented initial impulse and its reflection, on the right-hand side there is a Daubechies 6 wavelet function.

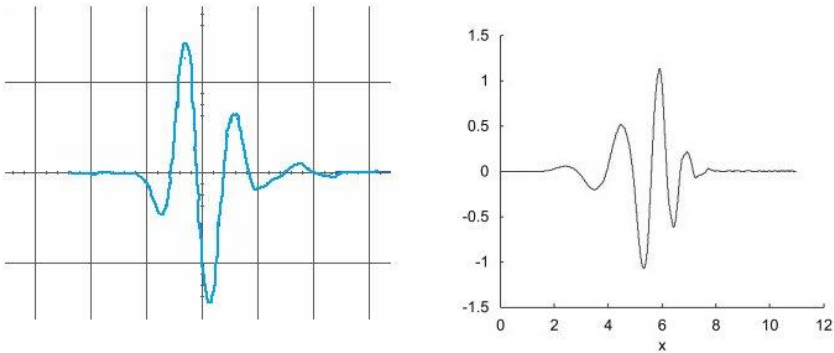


Figure 4. Initial impulse (left) and Daubechies 6 wavelet function (right) function

THEORY OF ULTRASOUND SCATTERING

We follow [5] to explain the concepts of SS and MSS from RF signals from two kind of phenomena, diffuse and coherent scattering. An RF echo signal is modeled as the interaction of an ultrasound pulse with the scattering structure. The RF signal $y(t)$ can be represented as the convolution of the impulse response $h(t)$ and the scattering function $x(t)$

$$y(t) = h(t) \cdot x(t)$$

where \cdot represents the convolution operator, and t is a time axis related to the radial distance by the propagation of the ultrasound pulse. The impulse response $h(t)$ incorporates the electromechanical characteristics of the transducer, diffraction, and frequency-dependent attenuation. The scattering function $x(t)$ can be written as

$$x(t) = \sum_{m=1}^{N_D} \alpha_m(t - \gamma_m) + \sum_{n=1}^{N_C} \beta_n(t - \nu_n),$$

where N_D is the total number of diffuse scatterers; α_m denotes the scattering function of the m th diffuse scatterer with delay γ_m corresponding to its effective scattering center; N_C is the total number of coherent scatterers; β_n denotes the scattering function of the n th coherent scatterer with delay ν_n corresponding to its effective scattering center. The RF echo $y(t)$ is sampled and the A-scan $y(n)$ is obtained.

The power spectrum of the A-scan can be computed by Fourier transform

$$Y(f) = FT [y(n)], P_{FT} = E [|Y(f)|^2],$$

where $E[\cdot]$ denotes the expectation operator.

The generalized spectrum GS of A-scan $y(n)$ (or spectral correlation) over a defined by bi-frequency plane by following relation

$$GS(f_1, f_2) = E [Y(f_1)\overline{Y(f_2)}],$$

where \overline{Y} is a complex conjugate. Each pixel in the bi-frequency plane carries information regarding correlation between frequency components f_1 and f_2 .

Periodically spaced coherent scatterers produce peaks in the A-scan $y(n)$ and its power spectrum $P(f)$. Therefore, the MSS can be estimated by detecting these peaks. The detection performance in the time domain can be enhanced by detecting the peaks in the wavelet approximation of the A-scan

Also, the peaks in the Fourier transform spectrum can be detected. The peaks in the time domain occur at $2d = \Delta t c$ and the peaks in the spectrum domain occur at

$$d = \frac{c}{2\Delta f} \quad (5)$$

where c is speed of sound, Δt is time interval, Δf is frequency interval, d is MSS. For the GS when the largest peak occurs at (f_{p1}, f_{p2}) then

$$\Delta f = |f_{p1} - f_{p2}|. \quad (6)$$

To enhance the performance of peak detection in Fourier power spectrum MSS estimate, quadratic transformation can be performed before the Fourier transform of the A-scan $y(n)$ and the $[y(n)]^2$ may be used for Fourier spectrum MSS estimate.

The quality of MSS estimates is directly related to the detectability of the peaks resulting from coherent scatterers. The detectability can be improved when coherent scattering components are effectively separated from diffuse scattering components in the A-scan $y(n)$. Such separation involves mathematical transformation including wavelet transformation. The modulus maximum of the wavelet transform identifies cusp-like local singularities in a signal. For this method the separation is achieved in wavelet multi-scale space by examining modulus maxima at different decomposing scales. The modulus maximum of WT corresponds to the location of coherent scatterers, and the distance between modulus maxima is computed as MSS [5].

To find the best estimation level for the wavelet transform we used the formula [3]

$$\log_2 \left(\frac{f_s}{f} \right) - 1 < J < \log_2 \left(\frac{f_s}{f} \right) \quad (7)$$

is and f_s is a sampling frequency and f the fundamental frequency from (5)

The percentage error of the MSS is obtained by the relation

$$e = \frac{|MSS_e - MSS_r|}{MSS_e} \cdot 100\%, \quad (8)$$

where MSS_e and MSS_r are measured and calculated approximate values of mean scatterers spacing correspondingly.

RESULTS

Experiment 1. The whole dataset has 510 lines and 1352 sampling points. To reduce the additional effects this dataset was cut to the 350 lines and 450 sampling points. From equality (7) $J = 1$, so we consider the 1st wavelet approximation level. In fig. 5 it is placed the initial dataset and its first level approximation with Daubechies 6 wavelets.

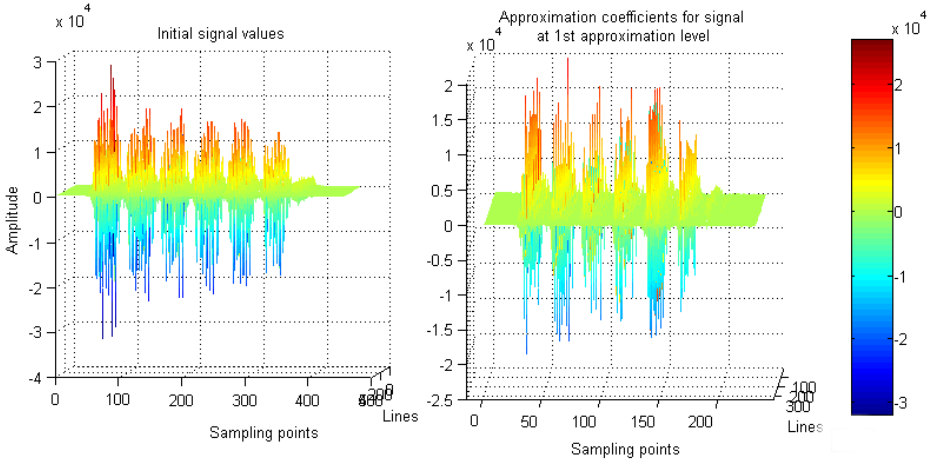


Figure 5. Initial data (left) and Daubechies 6 approximation of 1st level (right)

The coefficients distribution of Daubechies 6 wavelet for one chosen line, namely 320, are shown in fig. 6.

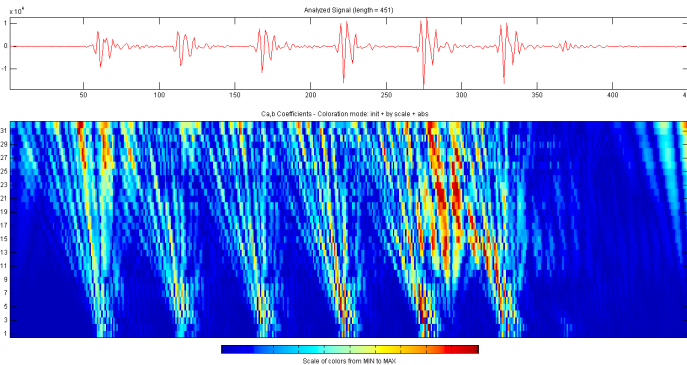


Figure 6. Db 6 coefficient distribution for one line of a backscattered signal from periodic structure

The mean scatterer's spacing for initial data was calculated from equation 5 the mean values for all lines $MSS_r = 0.9$ mm, from the experiment it follows that $MSS_e = 1.1$ mm. Thus the error would be $e = 22\%$ (from equality 8).

To calculate the MSS for the approximation level the was preformed the discrete wavelet transform with Daubechies 6 wavelet and then there were taken the mean values for all lines. The obtained dataset was divided onto 6 parts of 55 points, which will be bisected for each level and using the following equation

$$MSS = \frac{1}{6} \cdot h \cdot 2^n \sum_{i=1}^6 \text{dist}_i, \quad (9)$$

where dist_i are the distance between the positions of neighbouring points with maximal absolute value, h is sampling distance, n is the level of wavelet approximation. For signal calculated MSS from the data as distance between coordinates of maximal absolute values gives $MSS = 1.08$, $e = 1.82\%$ and the for the 1st approximation level $MSS = 1,096$ for 1st approximation level $e = 0.36\%$.

Experiment 2. The scalogram structure supposed that it would be possible to separate each scatterer (thread of the phantom). In the initial (0-level) to each thread correspond 480 initial points as the MSS of phantom is equal to 1.85 mm that is 2.4 msec of wave travelling.

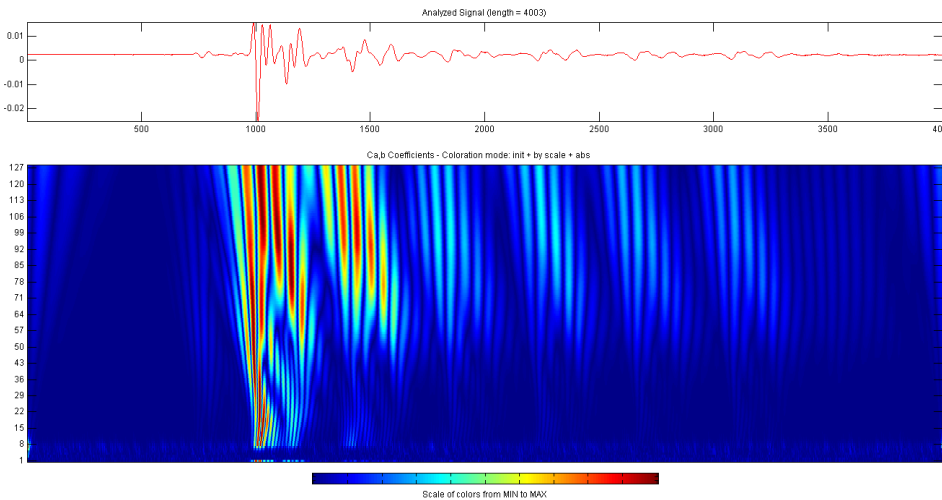


Figure 7. Db 6 coefficient distribution for analyzed plane signal with impulse frequency 6MHz

Using the sampling frequency and the central frequency of Daubechies 6 wavelets $f_0 = 0.7273$ it is possible to recalculate the scale coefficients and sampling distance and to juxtapose the real frequencies.

Table 3. Frequencies and sampling distance for approximation levels

Level	2^N	Frequency, MHz	Sampling, ns
1	2	72.73	13.75
2	4	36.36	27.5
3	8	18.18	55
4	16	9.09	110
5	32	4.5	220
6	64	2.27	440
7	128	1.14	880
8	256	0.57	1760
9	512	0.28	3520

According to the equality 7 the best level $J = 5$ that lays in the third approximation level. So we chose $j = 3$ for the MSS calculations. There was also used equality (9) with $h = 3.9 \mu\text{m}$. In fig. 8 there is presented the signal obtained with transducer 6F and the intervals of 480 points for each scatterer.

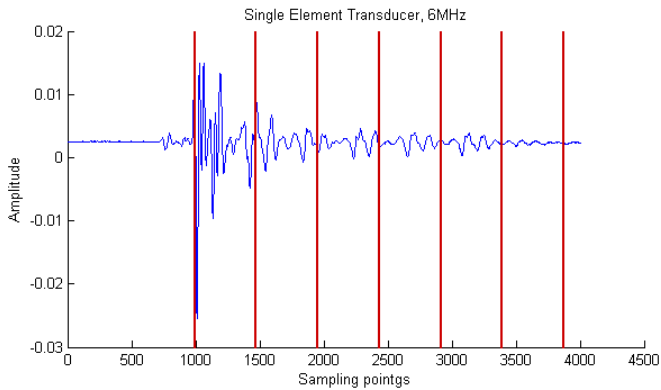


Figure 8. Division signal by intervals (6F transducer)

Table 4. MSS and error for experimental data

Transducer name	MSS for initial data	Error for initial data	MSS for chosen level	Error for chosen level
6F	1.99	7%	1.81	1.85%
3.5F	1.94	4,9%	1.77	4.2%
6P	2.1	12.7%	1.98	7.2%
1P	1.82	1.6%	1.64	12%

The obtained values for MSS and its error for signals and their approximation of 3rd level with Daubechies 6 wavelet functions are placed in the table 4.

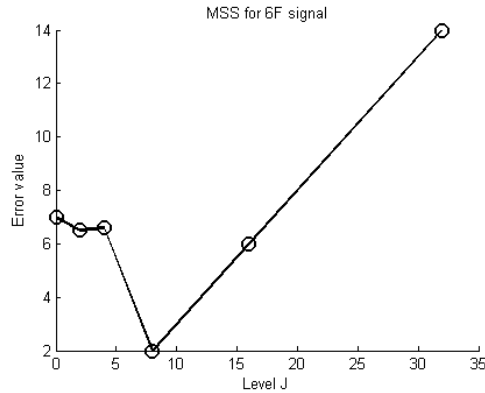


Figure 9. Error dependence on the level J for signal from 6F transducer

CONCLUSIONS

The application of wavelet decomposition of signals backscattered from tread phantoms made it possible to reduce the error of determining the real range between objects on which the ultrasound wave was reflected and scattered. The method of calculating MSS and searching for the optimal level J, in which the error is the smallest, is given. Further examinations will be carried out on ex vivo animal liver tissues, and the results obtained in the formulas will allow to repeat the procedure of finding optimal levels in wavelet decomposition that minimize the error of determining MSS, a parameter very important in soft tissue characterization.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Addison P. *The Illustrates Wavelet Transform Handbook*, IoP, Bristol-Philadelphia, (2002).
- [2] Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*, SIAM, Philadelphia (1993).
- [3] Ch. B. Machado, M. Meziri, G. Cortela, C. A. Negreira(b), W. C. Albuquerque Pereira. Continuous wavelet transform for tissue periodicity estimation: effect of noise and scatterers position variability. PROCEEDINGS of the 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, September 5–9, 2016. 10 p.
- [4] X. Tang, U.R. Abeyratne, Wavelet transforms in estimating scatterer spacing from ultrasound echoes. *Ultrasonics*, **38** (2000), pp. 688–692.
- [5] Z. Zhou, W. Wu, S. Wu, K. Jia, P. H. Tsui A Review of Ultrasound Tissue Characterization with Mean Scatterer Spacing. *Ultrasonic Imaging*, Vol 39, Issue 5 (2017), pp. 263–282.
- [6] B. Gambin, O. Doubrovina, Complex Analysis and Potential Theory With Applications, rozdział: Wavelet analysis for temperature increase detection from acoustic backscattered signal, Cambridge Scientific Publishers, (2014) pp.63–76.

-
- [7] B. Gambin , O. Doubrovina, Statistical properties of wavelet transform coefficients of backscattering signal from soft tissues and their phantoms *Hydroacoustics*, Vol. 16, Gdansk, 2013, pp. 59–66.
 - [8] B. Gambin , J. Wojcik, O. Doubrovina Differentiation of random structure properties using wavelet analysis of backscattered ultrasound // *Hydroacoustics*, Vol. 19, 2015, pp.121–128.

Jarosław DROZD*, Barbara Gambin**

SOLIDIFICATION OF DENTAL MATERIAL CLEARFIL F2 DESCRIBED BY COMPOSITE RHEOLOGICAL MODEL

* ASPEKTY,

Fundacja na rzecz rozwoju językoznawstwa komputerowego, logiki i badań nad językiem

** *Polska Akademia Nauk,*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki

e-mail: j.drozd@onet.eu

Abstract: The rheological model of the spring-dashpot type denotes one-dimensionally response model of viscoelastic material behavior described by a scheme of parallel and serial connections and by a set of parameters: elastic moduli and of viscosity coefficients. Processes of polymerization, crystallization and phase changes in viscoelastic materials are accompanied by a change of material parameters. In particular, viscoelastic properties of dental restorations made from Clearfil F2 evolve from viscid, almost liquid substance, to solid material during a short time of photo-polymerization. The objective of this paper is to propose a model of curing process of this material as part of the conception of „composite rheological models”. In the conception of „composite rheological models” values of elastic moduli and viscous coefficients are given as functions of new parameters introduced into the model. New parameters are divided into two groups. The first group is called as inner structure coefficients, and the second group as the base material properties. Relations (functions) between the new introduced parameters and elastic moduli and viscosity coefficients are built using information of the model structure. It is assumed that at each time step of the process, inner structure coefficients are changing, while the base material parameters remain constant. In the proposed model the relaxation curve is available for each moment of the process. It is demonstrated that the numerical simulation of the model response is consistent with the published experimental polymerization process of dental material Clearfil F2.

INTRODUCTION

In order to explain the new convention of building of one-dimensionally response visco – elastic models, proposed here, in what follows we synthetize the basis of classical spring – dashpot models. Let us remind that these models are built to describe the linear visco-elastic reaction of materials whose behavior in response to the applied "load" is neither purely elastic nor purely fluid-like. It is a combination of both of these reactions. The “reaction” to the applied one-dimensional "load", which could be a one-dimensional stress (or strain) state, is the time dependent one-dimensional strain (or stress) state. These time dependencies are described by the stress relaxation (or creep) curve [1].

Classic spring-dashpot models are defined by the assignment structure of parallel and series connections between a number of springs and dashpots and additionally, the two groups of parameters are fixed, one of which describes the elastic properties of the springs (Young’s modules) and the second group describes the viscosity coefficients of the dashpots, which were used to build the structure. The examples of some models are listed in Tab. 2. The

visco-elastic material behavior predicted by a dashpot-spring model can be equivalently described by a system of linear ordinary differential equations, containing time derivatives of stress and strain states, together with the initial condition describing the type of given "load" at the time $t = 0$, or periodic condition. The structure of parallel and series connections between a number of springs and dashpots corresponds to the order and form of differential equation while the coefficients in this equation are calculated from the two groups of parameters defined above [5]. The model is useful for calculating the behavior of a material in a particular engineering problem only when all its coefficients are known. Their values or estimations can be obtained only by fitting the shape of relaxation (creep) curves obtained experimentally to the curves predicted by the model. Such procedures for models with more than two constants lead to solving complex non-linear problems. Fitting theoretical curve to the experimental one with the assumed error, e.g. equal to the experimental measurements accuracy, is in general the great challenge. To find a more constructive and physically well interpreted way of solving the estimation problem a new procedure of building the dashpot-spring model is proposed. We call it the composite rheological model.

In the model the elastic moduli and viscosity coefficients are now assumed to be known functions of new parameters introduced into the model. New parameters can be obtained after the information about the values of Young modulus and viscosity coefficient of one spring and of one dashpot, respectively and the parameters directly defined by assumed structure of spring-dashpot. These parameters are divided into two groups. The first group is called as "base material properties". and the second group as "inner structure coefficients". Relations (functions) between the new introduced parameters and the elastic moduli and viscosity coefficients appearing in the classical model are given in the form which uses information of the connection type (parallel or serial) and the position of elements inside connection structure to which coefficients belong.

The introduction of the inner structure coefficients was based on the observation of a formal similarity of our model to the theory of the determination of macroscopic properties for the composite materials, limited in this considerations to the two-phase composites. In the case of two-phase composite the knowledge of the properties of individual components and their micro-scale geometrical configuration is assumed. There exists a special class of composites, namely the sequential laminated composites, which play a crucial role in the homogenization theory of composites [5]. A sequential laminate is defined by iteratively layering the two phases in different directions and proportions and at well separated scales [4].

The spring-dashpot model's construction is also sequential and only mutually perpendicular lamination directions are applied. The zero level is the spring and the dashpot, so-called base elements. We call them two phases of the composite, namely the solid phase and the viscous phase. Assignment of numerical values to elasticity and viscosity properties of spring and of dashpot, respectively, is the starting information for the algorithm that builds the numerical composite dashpot-spring model. Parallel and serial connections, in our interpretation correspond to the formation of layered composite in which the direction of the lamination is parallel or perpendicular to the loading direction. This process play a role of operations acting on basic elements in our algorithm. For example, connecting base elements in parallel or in series, we get well-known Voigt and Maxwell models.

As it was already stated, numerical values of elastic and viscous elements, used in the successive levels of our model are determined as functions of the "inner structure parame-

ters" interpreted as volume fractions of phases with graphical interpretation given in Tab.2. Therefore the inner structure parameters are positive numbers less than 1.

Table 1. Two basic simple elements (Symbols in all tables of this paper: w_k – width of the rectangle k , h_k – height of the rectangle k , here $k=1, \dots, 4$)













Abstract scheme, symbol, name	Composite scheme	Viscoelastic properties
 S: Spring		One property: E.
 T: Dashpot		One property: η .

Table 2. Two basic mixed composite elements: M, V and two compound composite elements: VS, VM

Abstract scheme, symbol, name	Composite scheme, inner structure coefficients	Viscoelastic properties as functions
 M: Maxwell model	 $C = h_1 / (h_1 + h_2)$	Properties: E_1, η_2 . $E_1(E, C) = E/C$ $\eta_2(\eta, C) = \eta / (1 - C)$
 V: Voigt model	 $C = w_1 / (w_1 + w_2)$	Properties: E_1, η_2 . $E_1(E, C) = E \cdot C$ $\eta_2(\eta, C) = \eta \cdot (1 - C)$
 Model VS: serial connection of V and S (Rabotnov model)	 $C_1 = h_1 / (h_1 + h_3)$ $C_2 = w_1 / (w_1 + w_2)$	Properties: E_1, η_2, E_3 . $E_1(E, C_1, C_2) = E \cdot C_2 / C_1$ $\eta_2(\eta, C_1, C_2) = \eta \cdot (1 - C_2) / C_1$ $E_3(E, C_1, C_2) = E / (1 - C_1)$
 Model VM: serial connection of V and M (Burgers model)	 $C_1 = h_1 / (h_1 + h_3 + h_4)$ $C_2 = w_1 / (w_1 + w_2)$ $C_3 = h_3 / (h_3 + h_4)$	Properties: E_1, η_2, E_3, η_4 . $E_1(E, C_1, C_2, C_3) = E \cdot C_2 / C_1$ $\eta_2(\eta, C_1, C_2, C_3) = \eta \cdot (1 - C_2) / C_1$ $E_3(E, C_1, C_2, C_3) = E / C_3 / (1 - C_1)$ $\eta_4(\eta, C_1, C_2, C_3) = \eta / (1 - C_3) / (1 - C_1)$

To describe the time-varying properties of a viscoelastic material, in particular to describe the curing process considered, we can build a series of models numbered by the successive time moments. We can apply different scenarios of model changes in time, they can be at the same time changes in the dashpot-spring connection structure as well as changes in parameter values.

This model is constructed with help of the computer program which can be used to generate also other, arbitrary a dashpot-spring model of one-dimensional viscoelastic constitutive law. With the numerical generation a large number of particular models can be obtained. The series of models can be enumerated by a time lag and shall be construct in such a way that prescribing different properties to every series element the arbitrary variations in time of viscoelastic behaviour process can be reproduced. Compound model of viscoelastic material is constructed from given number of elastic coefficients and viscosity coefficients. In our de-

scription this model contains new parameters corresponding to concept of “inner structure”. Change of viscoelastic properties is entirely described by appropriate change of values of these new parameters. In the paper the polymer’s cure process is modelled by elements described below in details. Two basic simple elements, namely “spring” and “dashpot” elements, see Tab. 1 are used to create any spring-dashpot type model used here. Every such model is viewed as a “composite” element having “inner structure”, that can be described using inner structure coefficients. Tab. 1 shows simple basic elements. Tab 2. shows two mixed basic elements that are the simplest composite elements and two compound composite elements.

In this model the load is always one-dimensional, and it is parallel to the vertical Y axis. Each viscoelastic property of a composite element is a function of viscoelastic property of the chosen simple element and a set of inner structure coefficients, C, C1, C2, C3. Every one of these coefficients is an arbitrary real number greater than 0 and less than 1.

COMPOSITE ELEMENT VM

Our model is based on composite element VM, because it is a generalization of it’s all possible substructures: S, T, V, M, VS, VT. Viscoelastic properties of VM model are defined by three inner structure coefficients: C1, C2, C3.

MODEL OF THE PROCESS

The process of solidification of dental material under the UV light is here modeled by a special changes of viscoelastic properties in time. The viscoelastic parameters depend on three coefficients varying in time: C1(t), C2(t), C3(t), and two constant parameters: $E = E_{Base}$, $\eta = \eta_{Base}$ according to the formulae shown in the third column of the last row of Tab. 2.

Young modulus $E = E_{Base}$ of the base simple spring element equals 10.45GPa and viscoelasticity coefficient $\eta = \eta_{Base}$ of the simple dashpot element has value of 1.07 GPa·s. We created complex model made of arbitrary number of VM elements. These elements we will call threads. Our multi thread model is similar to the Generalized Maxwell model used in [1], in which the response to instantaneous strain was calculated as a sum of stresses corresponding to each composite Maxwell element. In our model instead of Maxwell model we have VM composite-like element and the stress in each moment of time corresponds to appropriate single VM thread. Each VM thread has the same constant length $h_1+h_3+h_4=const$ and the same constant width $w_1 + w_2=const$. (h_1, h_3, h_4, w_1, w_2 are the sizes of rectangles shown in the second column of the last row of Tab.2), so this length and width are invariants for entire model of the process.

Interpretation of inner structure coefficients

Coefficient C1 is equivalent to Voigt sub-model portion in VM compound model. Coefficient C2 describes spring 1 portion in Voigt sub-model of VM model. C2 can be also viewed as the relative size of spring 1 in horizontal direction, that is proportional to it’s width, which is visible on Fig. 1. Expression C1(t)·C2(t) can be interpreted as the size of rectangle 1: $Size1(t)=C1(t)·C2(t)$. Coefficient C3 is spring 3 portion in Maxwell sub-model of VM model.

Transition process description

At the beginning of the transition process material element is made mostly of viscid phase, that surrounds the small amount of elastic phase and is assumed to be close to the pure liquid and viscid material. During the transition process, quantity of elastic phase increases and quantity of viscid phase decreases. At the end of the process the element structure is assumed to be the model of the solid phase.

Scenario

In our scenario the number of threads is 43, the time span between steps is 1s. Only one thread of type VM having number 0 exists at the time moment of the time step $t=0$ and in the time span $0 \leq t < 1$. Each next time step creates new thread of different values of $C1$, $C2$ and $C3$. The result is, that at the time step: $t=1$ and in the time span $1 \leq t < 2$ the thread with number 1 is working and stress of entire complex model equals the stress of thread number 1. At the time-step: $t=2$ and in the time span $2 \leq t < 3$ the thread with number 2 is working and the stress of entire complex model equals stress of the thread number 2. It repeats until second number 42.

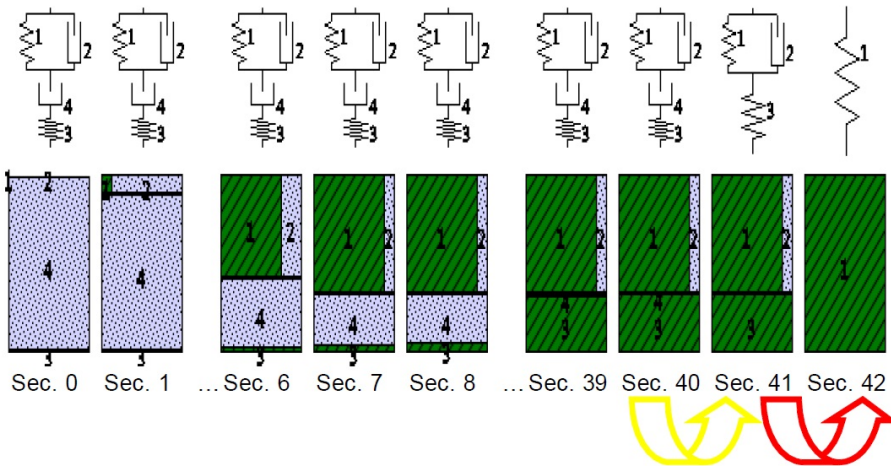


Figure 1. Scenario scheme. In each second one appropriate thread with unique values of parameters $E1(t)$, $\eta2(t)$, $E3(t)$, $\eta4(t)$ is active

We increase coefficients $C1$ and $C2$ during the first 8 seconds (from second 0 to second 7). The third inner structure coefficient $C3$ grows from second number 0 until second number 40. In second 41 dashpot number 4 disappears and our model of type VM turns to model of type VS (marked on Fig.1 with yellow arrow). In second 42 spring 1 melts with spring 3 and dashpot number 2 disappears and our model of type VS turns to simple spring (marked on Fig.1 with red arrow).

On Fig.1. and Fig 2. the time could be put as the horizontal axis. In the first 8 seconds spring 1 grows quickly (because both C1 and C2 grow). During all next seconds spring 3 grows linearly, because only C3 grows linearly and C1, C2 are constant.

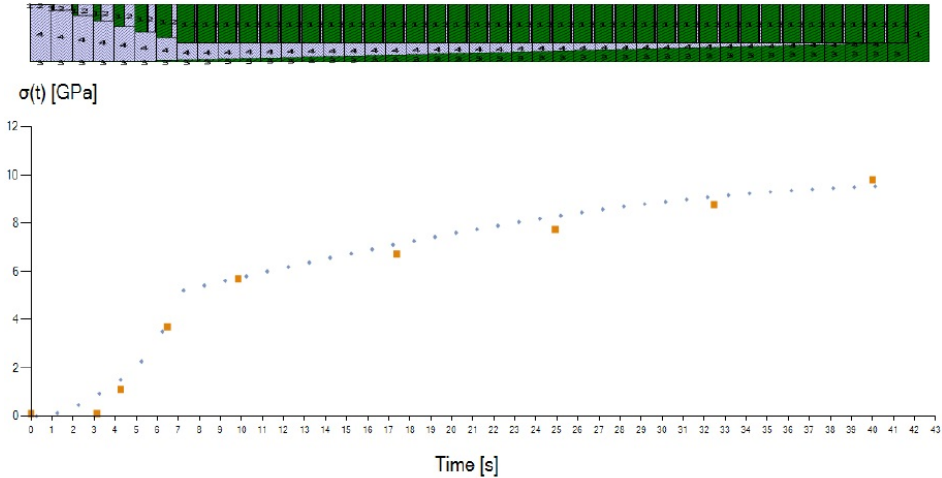


Figure 2. Chart of $\sigma_0(t), \dots, \sigma_4(t)$ synchronized with composite-like inner structure schemes for all seconds

On each thread we calculated the characteristic theoretical point that should have the same coordinates as the experimental point. The theoretical points are positioned on each line with the smaller marker. The experimental points are marked with bigger marker and are positioned independently. The line of theoretical points is consistent with the line of the experimental points for material Clearfil F2. The gel point is between the second number 4 and the second number 5 and is consistent with the location of the gel point in shrinkage time plot [2].

CONCLUSIONS

The process of “phase transition” from an almost liquid to a solid state has got intuitive interpretation, because only C1...C3 parameters, the volume fractions of liquid/solid phases, change their values during the entire process. To design all parameters values in the proposed composite model the solution of non-linear optimization problem, i.e. the minimization of the error of fitting theoretical to experimental results, was successfully solved. The numerically solved optimization problem is similar in spirit to the problem of topological optimization where the composite structure on fine scale must be designed, [3, 4].

Inner structure coefficients (C1(t), C2(t), C3(t)) reflect quantitative and topological information about relation between elasticity and viscosity. In our scenario these parameters change in time and are used as variables that describe the state of solidification process. More precisely, the quantity of liquid phase decreases at the expense of increasing the amount of the solid phase gradually, without changing the structure of connections up to the last step, marked

in red with an arrow in which the liquid phase no longer exists. Base parameters are independent on quantitative and topological information about relation between elastic and viscid states. As we have shown, base parameters (E_{Base} , η_{Base}) independent on elastic-viscous geometrical configuration could be assumed to be constant during the entire transition.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Montgomery T. Shaw, William J. Mac Knight., *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [2] Gambin W., *Visco-hypoelastic model of photo-polymerization process for small changes of temperature*, Arch. Mech., 62, 5, pp. 379-403, 2010
- [3] Allaire, G., *Shape optimization by the homogenization method*, Springer Verlag, New York, 2001
- [4] Allaire, G., Aubry, S., Jouve, F., *Shape optimization with general objective functions using partial relaxation*, in *Topology optimization of structures and composite continua*, G.I.N. Rozvany and N. Olhoff eds., pp.239-249, Kluwer Academic Publishers, 2000
- [5] Milton, G., *The theory of composites*, CambridgeUniveristy Press, 2001
- [6] N. Madani, A. Mojra, *Quantitative diagnosis of breast tumors by characterization of viscoelastic behavior of healthy breast tissue*, J MechBehav Biomed Mater, 68, 180-187, 2017

*Barbara GAMBIN, Eleonora KRUGLENKO, Jerzy LITNIEWSKI,
Ryszard TYMKIEWICZ*

**DYNAMIC ELASTICITY, ACOUSTICAL IMPEDANCE AND ATTENUATION
OF SPECIAL TISSUE-LIKE PHANTOMS**

*Polish Academy of Sciences,
Institute of Fundamental Technological Research
Pawinskiego 5B, 02-106 Warsaw, Poland
e-mail: bgambin@ippt.pan.pl*

INTRODUCTION

The efficiency of ultrasonic hyperthermia depends strongly on the absorption of a propagating medium, that is material ability to convert mechanical energy into heat. Calibration of the local and regional ultrasonic hyperthermia procedures, [1, 3, 4], should be performed on tissue mimicking phantoms. The different kind of soft tissue mimicking phantoms based on agar-gel were prepared. The three acoustic properties, speed of sound and attenuation of agar-gel, agar-gel doped with graphite micro-particles (GMP), agar-gel doped with magnetic micro-particles (MMP) and agar-gel doped with magnetic nanoparticles (MNP) have been determined experimentally. From the determined density and speed of sound, the modulus of elasticity and the acoustical impedance was calculated for every particular sample. Our idea to determine acoustic characterization of a special class of agar-gel based material is caused by the strong need to have tissue mimicking phantom models for ultrasonic and magnetic hyperthermia experiments. We restrict in what follows to study only acoustic properties of materials, but they contain magnetic particles of different sizes. We use magnetic particles having in mind their usefulness in our future magnetic hyperthermia study. Our considerations are limited to ultrasound waves in the frequency range of 1-20 MHz, which are used in the widely understood medical ultrasound. Such ultrasound waves are used in medical imaging as well as in therapies, particularly in the ultrasound hyperthermia. The wave length range varies from tenths of a millimeter to a few millimeters. The high frequency waves, i.e. shorter waves, allow imaging with a high resolution, but at the same time are much faster attenuated, so imaging techniques always are a compromise between penetration depth and image resolution, [2]. Even the macroscopically homogeneous human soft tissue exhibits in the submillimeter scales structural inhomogeneities. In medical imaging the different types of the inhomogeneous structure leads to tissue qualification through their average echogenicity. The observed frequency dependent ultrasound attenuation can be explained by two main physical phenomena, the sound scattering and absorption. The wave scattering is caused by the existence of small, compare to the wavelength, but at least of micrometer scales, inhomogeneities met by the wave in its propagation area. The second one is a conversion of

mechanical energy into heat, partially explained by the "resistivity" of a surrounding material to nanoscale length of particle oscillations, existing during the propagation of ultrasonic pressure wave, interpreted as "internal friction". In the living soft tissue some part of mechanical energy can also be lost for activation of biochemical processes. So, the acoustic absorption increases with the increasing viscosity of a medium. Summing up, the ultrasound attenuation in a medium with very small scatterers is strongly convolve from the both phenomena, scattering and absorption. The different types of soft tissue mimicking phantoms are used as a training material for medical doctors as well as for optimization of medical ultrasound systems. Most popular used agar-gel phantoms are usually enriched by oil additives or additions of micron and tenth of microns scatterers to make their acoustic properties similar to the properties of the living tissues, [5]. The measuring only attenuation coefficient, especially if it is given as a not frequency dependent quantity, one cannot quantify the absorption phenomenon from scattering. However the loss of energy by the wave traveling thorough the sample, that is a kind of "global" attenuation which is not frequency dependent is often used to evaluation of the absorption size as in papers [6, 7].

To produce the tissue like acoustical properties of agar-gel phantoms the stronger particles, like glass balls are dispersed in the agar-gel matrix. We used 7 types of samples, "pure agar-gel" sample (AG), agar-gel doped with graphite microparticles (GMP), agar-gel doped with magnetic micro-particles (MMP) and agar-gel doped with magnetic nanoparticles (MNP) with every doping in two different proportion of ingredients, namely of weigh percentage of 0.8 and 1.6 of the added particles. In the series of experiments we registre RF echoes of backscattered signals emitted by single-element transducer with focus posed on the metal reflector and in the focus posed inside the samples. Using these data the speed of sound and the frequency dependent attenuation can be obtained for every sample. Additionally, densities of sample materials will be determined, and the elasticity coefficient and acoustical impedance of every material calculated with the assumption of linear propagation.

PHANTOM PREPARATION

We used agar-agar from firm BIOMUS to produce phantoms. It is a gelling substance made from Rhodophyta, extracted from the shores of Japan. Agar is used as a neutral primer for media on which bacteria are grown in microbiological laboratories and in vitro cultures in biotechnology laboratories. The melting point of the agar is 88°C , the setting temperature is around 40°C . A precisely metered quantity of dry ingredients was put in a tightly closed container, and the boiled demineralised water was poured in with the FEOG (Phenoxyethanol, Ethylhexylglycerin) preservative, which is a material stable at a temperature of 120°C . A container with mixture was placed into the boiling water and the agar powder was allowed to dissolve, stirring mixture every few seconds. If the sample consists of pure agar without dopes, the moment of complete melting of the agar is confirmed by transparency of the mixture. While cooling the obtained solution, the container with dissolved agar was put into the ultrasonic cleaner (Ultrasonic baths, Bandelin Sonorex DT 52H) with the function of heating and temperature control. Turn on the timing, water in the washer had an initial temperature of 80°C , then the heater was turned off and the mixture was cooled to 50°C . The sonification were applied for effective mixing and fluidization. The mixture then returned to room tem-

perature under cover in the de-aeration device with negative pressure. Then the mixture was slowly poured into prepared polyester forms. After 24 hours the phantoms were considered ready for use and were placed in a refrigerator at a temperature of 4°C in a watertight package. Prepared samples had the shape of a cylinder, diameter of 44mm , height of 40mm . The micro and nanostructure of MNP phantom with 1.6% weight content is shown in Fig. 1 and Fig. 2.



Figure 1. The samples doped with MNP

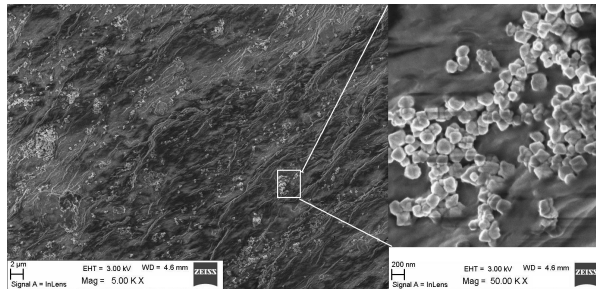


Figure 2. The samples doped with MNP

DENSITY MEASUREMENTS

The density ρ of a material is defined as its mass m divided per unit volume v , $\rho = m/v$. To measure the mass of rather soft samples made from a jelly-like substance in the form of cylinders, which surface ends are not exactly plain, the following procedures were applied. Using hydrostatic balance based on Archimedes' principle, which states that an object partially or wholly immersed in a fluid will be buoyed up by a force equal to the weight of the

fluid displaced by the object, it is possible to determine density of irregular shaped objects. Buoyant force B can be defined as $B = V \cdot \rho_l \cdot g$, where V denotes volume of the immersed object equal to the volume of the liquid displaced by the object, ρ_l density of the liquid the object is submerged in and g gravitational acceleration, respectively. The ratio of weight of the object in the air, W_a to the buoyant force is equal to the ratio of the object density to the liquid density the object is submerged in:

$$\frac{W_a}{B} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{V \cdot \rho_l \cdot g} = \frac{\rho}{\rho_l}. \quad (1)$$

Buoyant force is defined as $B = W_a - W_l$, where W_l denotes weight of the object in the liquid. Therefore the ratio of density of the object to density of the liquid the object is submerged in can be expressed as: $\frac{\rho}{\rho_l} = \frac{m}{m - m_l}$ and the density writes as $\rho = \frac{m}{m - m_l} \cdot \rho_l$.

To measure the agar sample densities hydrostatic electronic balance with specific gravity platform, beaker, special cutting edge and glass vessel were used. Small pieces of material are isolated from agar samples. All pieces are placed under glass vessel to prevent evaporation of water from samples. Each isolated piece of sample is placed on the balance and its masses are measured both in the air and in the water. The experiment was conducted at a temperature of 26°C for graphite and MMP doped agar-gel samples, when the density of water was equal $0,99678 \text{ g/cm}^3$, and at a temperature of 27°C for MNP doped agar-gel samples and for pure agar samples, when density of water was equal $0,99651 \text{ g/cm}^3$.

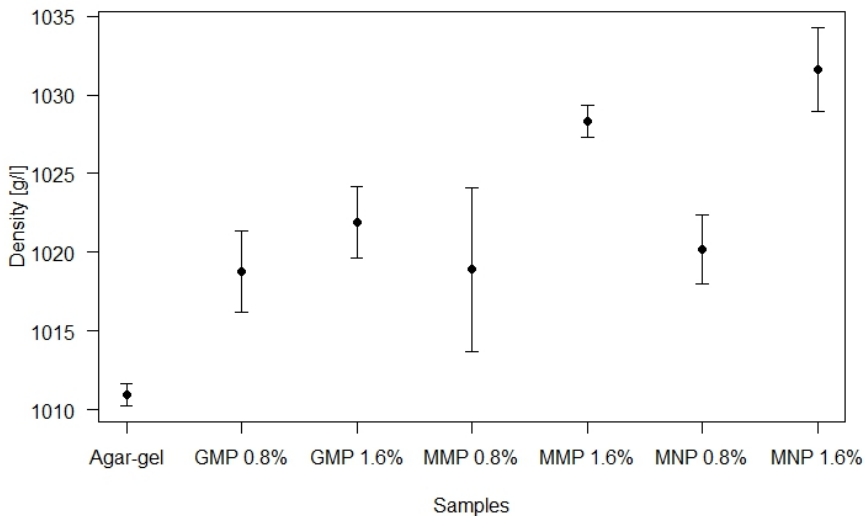


Figure 3. The density for different samples

ACOUSTIC PROPERTIES

Attenuation

The one-piece focusing piezoelectric transducer (Vermon type) with center frequency 6 MHz, diameter 10 mm and focal length 62 mm was used to measure the reflected signal propagated in water and in water with immersed in it a sample, see Figure x. The ultrasound transducer was excited by spike voltage using ultrasonic pulser/receiver (DPR300, JSR, Pittsford NY, USA). The RF echo data were acquired by a digital oscilloscope (Agilent, MSO6052A, USA) with a sampling rate of 50 MHz. All processing with collected RF echoes was done on the computer. Attenuation of ultrasonic waves has been measured by the echo method on the basis of a comparison of two pulses frequency spectra. Firstly, a single pulse has been sent in the water and RF signals has been recorded after reflection from the reflector, then - the same pulse has been sent after placing the sample into the path of the pulse propagation and RF signals has been recorded after reflection from the reflector. The transducer was mounted so that the focus was on the reflector. Using sliding tables, the sample was moved in 2 mm increments to collect signals from different places. The scheme of determination of the attenuation coefficient by the reflection method is depicted in Fig. 4.

Attenuation coefficient depending on the frequency has been calculated using the formula (2):

$$\alpha(f) = \frac{-10}{\Delta z} \log_{10} \frac{|B(f)|}{|A(f)|} \quad (2)$$

where Δz - phantom width, $|A(f)|$ and $|B(f)|$ - spectrum of the reflected signal without sample and with sample, respectively. The attenuation coefficient frequency dependence is calculated and the linear regression applied to the obtained points enables to calculate the attenuation in the form $\alpha(f) = \alpha_0 \cdot f$ with α_0 coefficients in units ($dB/MHz \cdot cm$) are obtained. The results are presented in Fig. 5. Let us remain that the attenuation coefficient for the soft tissue is c/a 0.6 dB/(cm MHz), for water - 0.0022 dB/(cm MHz), for blood - 0.2 dB/(cm MHz).

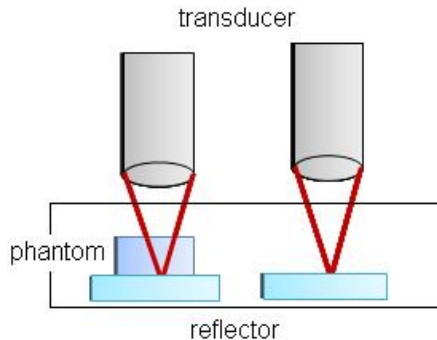


Figure 4. The scheme of the attenuation coefficient determining

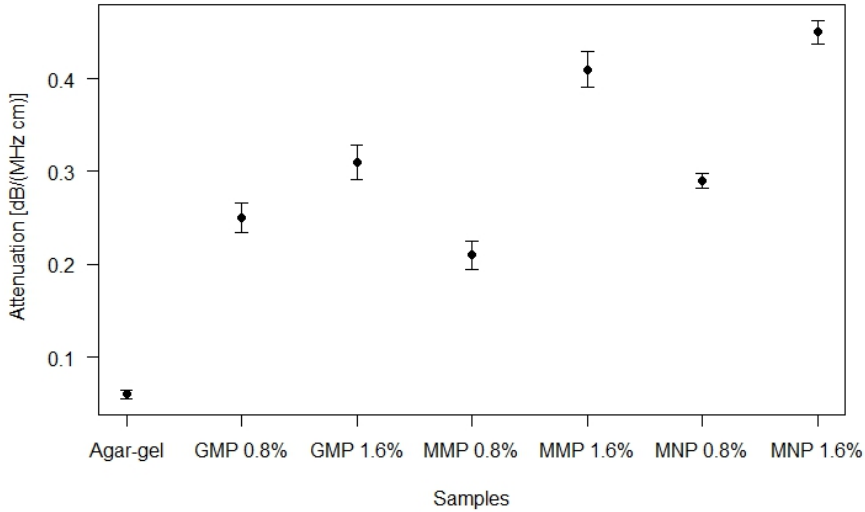


Figure 5. The attenuation coefficient values for all phantoms with marked SD range

Speed of sound

The average value from 25 measurements together with SD (standard deviations) for SOS are presented in Fig. 6. The speed of sound is calculated as

$$c = \left(\frac{1}{c_0} - \frac{\Delta t}{2z} \right)^{-1} \quad (3)$$

from the measured time shift between the pulse propagated through water and in through the sample.

Elasticity coefficient and impedance calculations

The elasticity coefficient is calculated as $E = \rho SOS^2$ and the acoustical impedance is calculated from $i = \rho SOS$.

The influence of increasing fraction of doping particles on the acoustic SOS, elasticity coefficient and acoustical impedance average values for the 3 different types of samples, are shown together in Fig. 7.

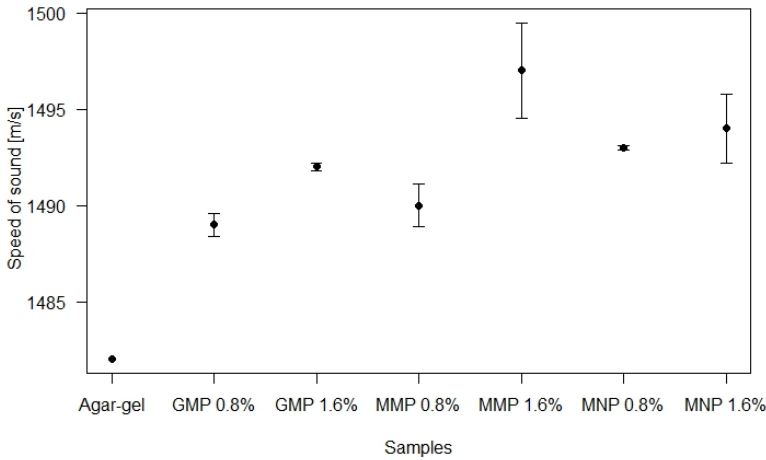


Figure 6. SOS for different samples with marked SD ranges

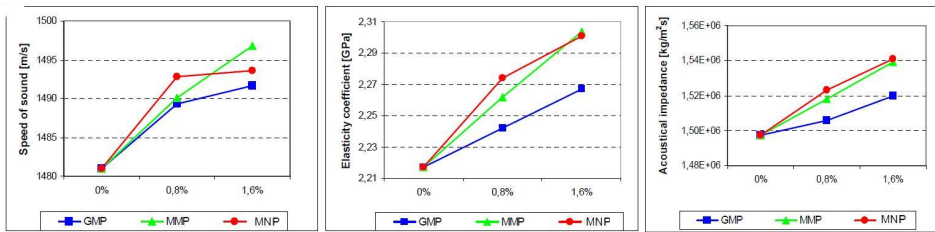


Figure 7. The comparison of SOS, elasticity and acoustic impedance for all samples materials

CONCLUSIONS

The differences in all acoustical properties in between of three types of particles added to agar-gel matrix are summarized in the Fig. 7. The higher values of attenuation for MNP dopings are explained by the size of inhomogeneities, which is less than the particles taking part in the scattering process. The estimation of backscattering process characteristics can answer the question which particles sizes are more responsible for scattering so, they absorb less energy than others. The absorption is studied independently by measuring the temperature rises variations during ultrasound heating experiments. From the differences between acoustical properties, especially the differences in the frequency dependent attenuation the differences in the sample structures can be deduced. The measurements demonstrated that the nanoparticles adding increased the density of the material compare to adding microparticles made, even that both particles was made from the same magnetic material. The elasticity

coefficient and impedance are proportional to the fraction of particles and the elasticity of phantom components. The most interesting conclusion concerns in comparison of difference in ultrasonic attenuation. The attenuation of agar-gel with MNP dopings exhibited the largest value in between all studied cases. This allows us to believe that the local heating of that phantom by the ultrasonic beam (i.e. the ultrasonic hyperthermia experiment) should exhibit the highest efficiency. In this case, and dopes of iron oxide nanoparticles can be considered as better "sono-sensitizers" in performing ultrasonic hyperthermia, than microparticles. It is worth noting, that this result was confirmed by the measuring of temperature rise during the heating of phantoms by the focused ultrasound beam. The results are included in this book in the paper *Efektywność hipertermii ultradźwiękowej w agarowych wzorcach tkanki miękkiej domieszkowanych różnymi składnikami*, by E. KRUGLENKO, I. KORCZAK, B. GAMBIN.

Acknowledgements

The authors are grateful for scientific consultations, information and received samples of magnetic nano-particles to the scientific team of the Faculty of Physics of the University of Poznan, in particular prof. Arkadiusz Józefczak, involved in the study of nano-magnetic particles for the purpose of medical applications.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education in Poland for the Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences research plan for 2017 year, *Subject: Thermal and acoustic properties of soft-tissue phantoms doped with magnetic nanoparticles*, realized in Department of Ultrasound.

BIBLIOGRAPHY

- [1] B. Gambin, E. Kruglenko, Temperature Measurement by Statistical Parameters of Ultrasound Signal Backscattered from Tissue Samples, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 128, 1-A, A-72 - A-78, 2015.
- [2] *Quantitative Ultrasound in Soft Tissues*, Eds. J. Mamou, M. L. Oelze, Springer 2013.
- [3] Gambin B., Kujawska T., Kruglenko E., Mizera A., Nowicki A., Temperature Field Induced by Low Power Focused Ultrasound on Soft Tissues During Gene Therapy. Numerical Predictions and Experimental Results. *Archives of Acoustics*, 34, 4, 445-459, 2009
- [4] Kruglenko E., Gambin B., RF signal amplitude statistics during temperature changes in tissue phantoms, *HYDROACOUSTICS*, ISSN: 1642-1817, Vol.17, pp.115-122, 2014
- [5] Kruglenko E., Gambin B., Cieřlik L., Soft Tissue-Mimicking Materials With Various Number of Scatterers and Their Acoustical Characteristics, *HYDROACOUSTICS*, ISSN: 1642-1817, Vol.16, pp.121-128, 2013
- [6] Józefczak A., Kaczmarek K., Hornowski T., Kubovčíková M., Rozynek Z., Timko M., Skumiel A., Magnetic nanoparticles for enhancing the effectiveness of ultrasonic hyperthermia *Applied Physics Letters*, 108, 263701, 2016. DOI: 10.1063/1.4955130
- [7] Józefczak A., Kaczmarek K., Kubovčíková M., Rozynek Z., Hornowski T., The effect of magnetic nanoparticles on the acoustic properties of tissue-mimicking agar-gel phantoms, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 431, 172-175, 2017

Ilona KORCZAK, Barbara GAMBIN, Eleonora KRUGLENKO
**STABILIZACJA TEMPERATURY ORGANU PODCZAS ZABIEGU
TRANSPLANTACJI**

*Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki
e-mail: korczak.ilona.maria@gmail.com*

Streszczenie: Według danych statystycznych Centrum „Poltransplant” w roku 2017 w Polsce wykonano 1531 zabiegów transplantacji w tym 1004 przeszczepy nerki [1]. Praca badawcza ma na celu udoskonalenie warunków hipotermii narządu podczas zabiegu transplantacji. Ochrona organu przed uszkodzeniem spowodowanym niedokrwieniem jest zależna od odpowiedniego schłodzeniem organu w czasie od pobrania od dawcy do wczepienia biorcy. Niedokrwienie spowodowane jest ograniczeniem lub przerwaniem dopływu krwi do tkanek narządów, co skutkuje niedoborem tlenu w komórkach organu. Proces ten ma znaczący wpływ na martwicę obszarów komórkowych w narządzie, co skutkuje opóźnieniem podjęcia funkcji przez przeszczep lub nawet prowadzi do jego odrzucenia. Okres niedokrwienia „zimnego” jak i „ciepłego” powinien być zminimalizowany do jak najkrótszego czasu. Najistotniejszym czynnikiem wpływającym na zapobieganie skutkom niedokrwienia jest prawidłowe przechowywanie organów. Celem optymalnej procedury przechowywania organu jest także maksymalne spowolnienie metabolizmu aby zachować zdolność przeszczepu do podjęcia czynności po odtworzeniu krążenia u biorcy. Możliwe jest to dzięki odpowiedniemu schłodzeniu tkanki do temperatury od 0–4°C. Używane przez transplantologów metody, które służą do obniżenia/utrzymania temperatury organu, to tzw. hipotermia prosta lub ciągła oraz perfuzja pulsacyjna. Powyższe techniki nie gwarantują jednorodnego chłodzenia narządu oraz nie utrzymują stabilnej temperatury podczas zabiegu transplantacji.

W tym celu zaprojektowano innowacyjne urządzenie chłodzące mające za zadanie utrzymać równomierny rozkład temperatury wewnątrz transplantowanego organu. W doświadczeniu odtworzono termiczne warunki panujące w trakcie przeszczepu i pomierzono zmiany temperatury narządu (nerki świńskiej *ex vivo*) włożonego w urządzenie chłodzące w trakcie symulacji transplantacji. Urządzenie było chłodzone solą fizjologiczną o temperaturze 4°C. Pozwoliło to na utrzymanie niskiej temperatury organu w zakresie 10–15°C w czasie 30 minut.

WPROWADZENIE

Nerka to parzysty narząd pełniący w organizmie człowieka istotne funkcje związane z procesami i przemianami metabolicznymi. W przypadku przewlekłej niewydolności nerek zastąpienie funkcji narządu następuje poprzez leczenia pozaustrojowe tzw. sztuczną nerkę inaczej dializator. Za złoty standard w leczeniu niewydolności nerek uznaje się przeszczep nerki czyli transplantację. Obejmuje ona pobieranie/przeniesienie komórek, tkanek i narządów oraz ich odpowiednie zabezpieczenie. Termin transplantologia powiązany jest również z szeregiem czynności związanych z przeszczepieniem narządu, czyli przygotowanie dawcy/biorcy do operacji, późniejszym leczeniem, wybraniem techniki operacyjnej oraz wszelakimi zagadnieniami prawno–etycznymi związanymi z przeszczepem [2].

Jedną z najstarszych metod służącą do uśmierzania bólu, bądź powodującą działanie przeciwwzpalne było leczenie zimnem w postaci chłodnego okładu z lodu. Rozwój technologii pozwolił na skroplenie takich gazów jak tlen, azot czy dwutlenek węgla, co przyczyniło się

do rozwoju kriotechniki w medycynie. Kriotechnika znalazła zastosowanie w transplancji, ponieważ jednym z kluczowych czynników wpływających na zabezpieczenie organu przed niedokrwieniem jest poprawne jego schłodzenie. Problem zniwelowania skutków niedokrwienia stanowi w środowisku lekarzy transplantologów przedmiot dyskusji. Etiologia niedokrwienia, możliwości jej zahamowania są tematem licznych badań. Według R.Celne uszkodzenie transplantu w wyniku niedokrwienia może mieć większe znaczenie na przeżywalność/przyjęcie przeszczepu aniżeli czynniki immunologiczne [3]. W technice medycznej wyróżniamy dwa okresy niedokrwienne. Niedokrwienie ciepłe, czyli okres w którym narząd nie jest zaopatrywany w krew ani nie jest schłodzony oraz niedokrwienie zimne, czyli okres w którym transplantowany organ pozbawiony jest krwi i schłodzony do odpowiedniej dla niego temperatury. W przypadku przedłużającego się okresu nie zaopatrywania tkanek w tlen dochodzi do uszkodzenia organu na poziomie komórkowym. Długotrwałe niedokrwienie ciepłe charakteryzuje się brakiem zaopatrzenia w tlen komórek oraz zatrzymaniem procesów biochemicznych takich, jak produkcja NAD czy ATP. Związki te są podstawowymi związkami energetycznymi komórki. Ponadto, niedobór tlenu sprzyja produkcji kwasu mlekowego, który powoduje lokalne zakwaszenie środowiska wewnątrzkomórkowego oraz wstrzymuje działanie pompy sodowej. Najgroźniejszym skutkiem niedokrwienia ciepłego jest wytworzenie wolnych rodników w transplancji. Proces ten może powodować uszkodzenie błon komórkowych, w wyniku czego może to doprowadzić do odrzucenia przeszczepu. Według danych literaturowych i badań doświadczalnych udowodniono, iż narząd schłodzony do 5°C wykazuje nie większe niż 5% zapotrzebowanie na tlen w temperaturze 37°C. Zatem, niedokrwienie w stanie obniżonej temperatury powoduje zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego komórki nie zatrzymując jej metabolizmu. Zmniejsza tempo przemian metabolicznych, co powoduje opóźnienie apoptozy komórki [4]. Nadmierne schłodzenie organu również niekorzystnie wpływa na komórki narządu. Dlatego po wstępnym ochłodzeniu narządu płynem chłodzącym o temperaturze 0-4°C zadaniem pojemników, bądź urządzeń chłodzących jest utrzymanie temperatury organu na stałym poziomie. W celu złagodzenia skutków niedokrwienia zimnego stosuje się wszelakiego rodzaju płyny prezerwacyjne mające za zadanie uzupełnienie molekuł wewnątrz i zewnątrzkomórkowych, elektrolitów, substancji regulujących – odżywczych oraz zapobiegających kwasicy komórkowej.

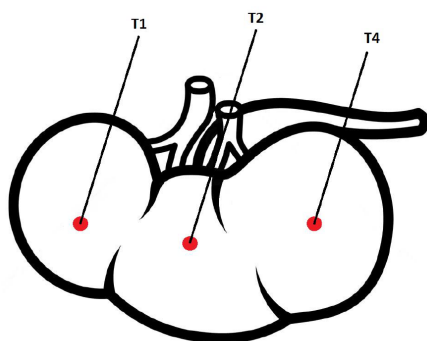
Wyróżniamy cztery standardowe techniki chłodzenia narządów przeznaczonych do zabiegu transplancji. Pierwszą z technik jest schładzanie powierzchniowe polegające na zanurzeniu organu przeznaczonego do transplancji w płynie o temperaturze 0°C. Metoda ta pozwala na schłodzenie powierzchni organu, bez możliwości zapewnienia niskiej stabilnej temperatury wewnątrz całego organu. Ponadto opisana metoda nie pozwala na wypłukanie łożyska naczyniowego przeszczepu. Technika ta jest rzadko stosowana. Drugą techniką służącą do obniżenia temperatury organu jest metoda ciągłej perfuzji. Polega ona na przefiltrowaniu naczyń zaopatrujących przeszczep w krew roztworem o temperaturze 4°C. Metoda ta zapewnia dużą szybkość oraz jednorodność schładzania narządu, dodatkowo uwzględniając wypłukanie naczyń. Jest to jedna z najczęściej stosowanych metod do odpowiedniego przygotowania organu do przeszczepu. Trzecią techniką chłodniczą jest schładzanie organu poprzez perfuzję „*ex vivo*”. Metoda ta polega na obniżeniu temperatury organu poza organizmem dawcy. Stosowana najczęściej podczas pobrań od dawców żywych. Ostatnią metodą służącą do obniżenia temperatury tkanki jest przepłukiwanie „*in situ*”, czyli przepłukiwanie w organizmie dawcy. Technika ta polega na przepłukiwaniu i chłodzeniu organu płynem chłodzącym

w organizmie dawcy tuż przed zabiegiem operacyjnym. Metoda ta pozwala na całkowite wyeliminowanie niedokrwienia ciepłego, jednakże znalazła zastosowanie tylko w przypadku pobrań od dawców w wyniku śmierci mózgu. Wyróżniamy dwie techniki przechowywania schłodzonych narządów przed zabiegiem transplantacji. Metoda termostabilna, która polega na zanurzeniu narządu w płynie o temperaturze od 0 do 4°C. Pobrany narząd zanurzany jest w płynie perfuzyjnym o właściwościach konserwujących w specjalnie do tego przygotowanym izotermicznym naczyniu. Często naczynie takie jest wypełniane kostkami lodu bądź suchym lodem. Do zalet tej metody zaliczamy niski koszt oraz dużą skuteczność chłodzenia w odniesieniu do takich narządów jak wątroba czy trzustka czy takich organów jak uszy, język czy palce kończyny górnej. Dla bardziej wymagających narządów takich, jak serce czy nerka niezbędne jest zastosowanie pojemników izotermicznych wyposażonych w układy sprężarkowe bądź termoelektryczne. Według regulowań medyczno –prawnych długość okresu przechowywania i transportu narządów, czy organów z wykorzystaniem tej metody nie może przekroczyć 48 godzin. Metoda ciągłej perfuzji hipotermicznej jest charakterystyczna techniką do utrzymania niskiej temperatury narządów tzw. wysokiego ryzyka. Do których zaliczamy serce lub nerki. Główną zaletą tej metody jest przedłużony czas przechowywania organu (72 godziny). Nerkę przechowuje się w specjalnie przygotowanym pojemniku, który umożliwi stałą perfuzję chłodzonym roztworem wzbogaconym w tlen. Ponadto technika ta pozwala na kontrolowanie takich parametrów jak temperatura narządu, ciśnienie perfuzyjne czy parametry biochemiczne narządu. Do utrzymania niskiej temperatury narządów i organów powszechnie używane są takie roztwory jak roztwór Euro-Collins, roztwory kardioplegiczne czy roztwór UW. Narządy do transplantacji zostały podzielone na trzy grupy takie jak: narządy wysokiego ryzyka, narządy typu A oraz narządy typu B. Pojemniki do transportu narządów również można podzielić na trzy grupy. Pierwszą z nich są pojemniki izotermiczno–elektroniczne, które charakteryzują się dużą dokładnością regulacji temperatury. Przeznaczone są one do transportu narządów wysokiego ryzyka (czyli serca czy nerek). Drugą grupą pojemników są pojemniki izotermiczne do transportu narządów A. Pojemniki izotermiczne typu A przeznaczone są do transportu takich narządów jak wątroba czy trzustka. Pojemniki zapewniają niską temperaturę na wybranym poziomie w skali od 0 do 4°C. Do chłodzenia narządów najczęściej wykorzystywany jest suchy lód. Pojemniki izotermiczne typu B przeznaczone są do transportu takich organów jak palce, język czy małżowina uszna. Pojemniki przeznaczone do transportu tych organów utrzymują temperaturę w przedziale od -10 do 5°C. Konstrukcja pojemników przeznaczonych do transportu organów, czy narządów do przeszczepu pozwala na regulację temperatury z dokładnością do 1K w zależności od wymagań temperaturowych transplantatu [5–7].

MATERIAŁ I METODA BADAWCZA

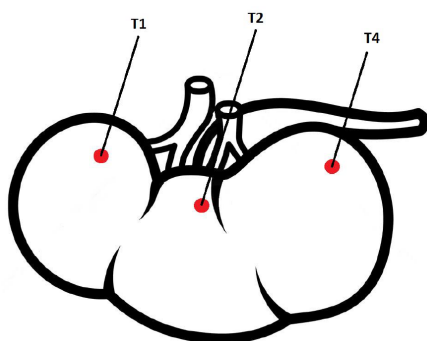
Materiałem badawczym były dwie świńskie nerki o wymiarach: 14cm x 8cm x 3cm. Przed wykonaniem doświadczenia narządy zostały schłodzone do temperatury 4°C. Czas chłodzenia wynosił 24 godziny. Podczas eksperymentu zasymulowano termiczne warunki zabiegu transplantacji. Świńską nerkę umieszczono w urządzeniu chłodzącym. Element chłodzący został wykonany z biologicznie bezpiecznego materiału. Substancją chłodniczą była sól fizjologiczna krążąca w obiegu zamkniętym. Prędkość przepływu wynosiła 10ml/s. Temperatura medium chłod-

niczego wynosiła 4°C . Podczas doświadczenia temperatura płynu chłodzącego była utrzymywana na stałym poziomie. Warunki termiczne organizmu, czyli temperatura 37°C , zasymulowano przy pomocy układu elektrycznego. Stanowisko badawcze składało się z następujących elementów: system komputerowy, termopary, termometr, naczynie 300ml z płynem chłodzącym, pompka tłocząca ciecz, urządzenie chłodzące, układ elektryczny symulujący temperaturę ciała. Doświadczenie przeprowadzono w warunkach pokojowych w temperaturze 21°C . Wykonano dwa pomiary. Pomiar pierwszy trwał 60 minut. Zmierzono rozkład temperatury wewnątrz świńskiej nerki. Punkty pomiarowe temperatury wewnątrz narządu umieszczono jak na rysunku poniżej. Głębokość umieszczenia termopar wynosiła 3cm.



Rysunek 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych temperatury w świńskiej nerce na głębokości 3cm
[Opracowanie własne]

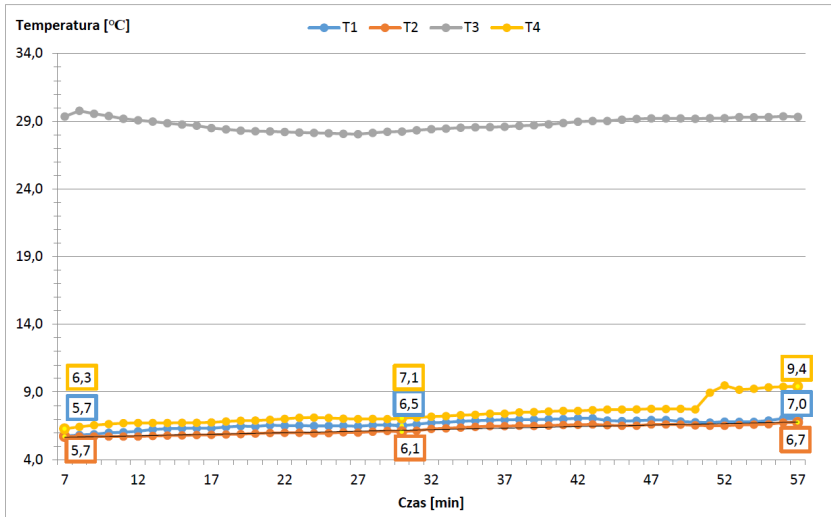
Po wykonaniu doświadczenia nr 1 ponownie powtórzono pomiar. Pomiar drugi trwał 30 minut. Punkty pomiarowe temperatury zostały umieszczone tuż pod powierzchnią nerki. Ponownie zmierzono rozkład temperatury wewnątrz analizowanego materiału. Głębokość umieszczenia termopar wynosiła 1cm pod powierzchnią tkanki.



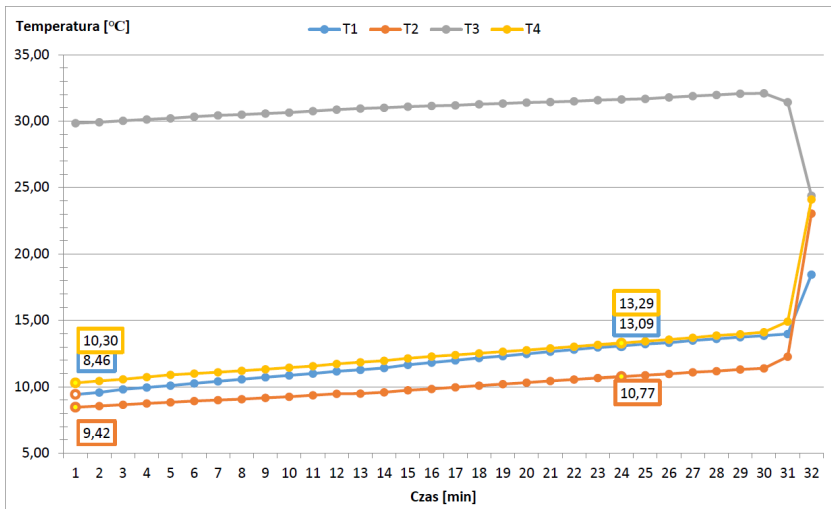
Rysunek 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych temperatury w świńskiej nerce na głębokości 1cm
[Opracowanie własne]

WYNIKI I ANALIZA WYNIKÓW

Uzyskane wyniki pomiaru temperatury podczas doświadczeń termicznych przedstawiono na wykresach poniżej.



Rysunek 3. Wyniki pomiaru nr 1 zmiany temperatury chłodzonego narządu w funkcji czasu



Rysunek 4. Wyniki pomiaru nr 2 zmiany temperatury chłodzonego narządu w funkcji czasu

Zgodnie z rysunkiem 3 temperatura początkowa pomiaru wewnątrz organu wynosiła odpowiednio 6,3°C oraz 5,7°C. Po 30 minutach nastąpił wzrost temperatury o 1°C dla termopary nr 4, o 0,8°C dla termopary nr 2 oraz o 0,4°C dla termopary nr 1. Na głębokości 3cm pod powierzchnią tkanki uśredniona temperatura organu wyniosła 7,7°C. Temperatura organu po około 60 minutach pomiaru nie przekroczyła 10°C. Zasymulowana początkowa temperatura organizmu biorcy wynosiła 29,0°C (T3).

Zgodnie z rysunkiem 4 temperatura początkowa dla termopary nr 1 wynosiła 8,46°C. Dla termopary nr 2 odczyt temperatury wynosił 9,42°C, dla termopary nr 4 równał się 10,30°C. Zasymulowana początkowa temperatura organizmu wynosiła 30°C (T3). Po upływie 25 minut różnica między początkową a końcową temperaturą dla pierwszej termopary wyniosła 4,63°C, dla drugiej termopary równała się 1,35°C, dla czwartej termopary wyniosła 3°C. Temperatura chłodzonego narządu nie przekroczyła 15°C. Uśredniona temperatura organu pod powierzchnią 1cm podczas całego pomiaru wynosiła 11,67°C.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Medycyna regeneracyjna jest jednym z kierunków badań włączanych od kilku lat w Krajowy Program Badań, a więc prace badawczo-wdrożeniowe prowadzone w celu rozwoju medycyny regeneracyjnej wpisują się w główne cele polityki naukowo-technicznej i innowacyjnej państwa, która określa strategiczne kierunki badań naukowych i prac rozwojowych. Rozwój medycyny regeneracyjnej, w szczególności przeszczepy narządów wewnętrznych takich jak nerki, wątroba, serce umożliwiają już dzisiaj nie tylko przedłużenie życia ludzkiego, ale i przywrócenie pacjentów ciężko chorych do pełnej aktywności zawodowej. Beneficjentami jest więc nie tylko pojedynczy pacjent, ale całe społeczeństwo, co potwierdza, że osiągnięcia w tej gałęzi nauki są naturalną realizacją polityki społecznej państwa. Przeszczepianie narządów wewnętrznych wymaga utrzymania odpowiednio niskiej temperatury narządu od chwili pobrania od dawcy do czasu podłączenia tego narządu do krwioobiegu biorcy.

Do tej pory utrzymanie niskiej temperatury organu było możliwe poprzez zastosowanie wszelakiego rodzaju pojemników chłodzących narządy przeznaczone do zabiegów transplantacji oraz wszelakich technik, które miały na celu utrzymanie niskiej temperatury organu. W wykonanym doświadczeniu termicznym wykazano, iż urządzenie chłodzące utrzymuje stałą, niską temperaturę organu w całej jego objętości w czasie, co najmniej 30 minut zabiegu. Zastosowany zabieg jednorodnego obniżenia temperatury w całej objętości materiału zwiększa powodzenie zabiegu transplantacji. Urządzenie chłodzące jest łatwe w implikacji. Jego zwarta i prosta konstrukcja pozwala na efektywne chłodzenie narządu. Prawidłowe przechowywanie narządów do transplantacji oznacza zatem proces, który polega na odpowiednim schłodzeniu narządu transplantowanego oraz utrzymaniu jego stałej niskiej temperatury do momentu wszczepienia u biorcy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.poltransplant.org.pl/statystyka_2017.html, dn. 29.01.2018
- [2] Bullock, J., Boyle, J. i Wang, M.: Część V. Fizjologia nerek. W *Fizjologia*, Urban & Partners. s.349–445

-
- [3] Masternak M., Napiórkowska J.: *Transport organów, czyli gdy liczy się każda sekunda*. Translogistics 2014. S.15–39
 - [4] Uchmanowicz I.: *Profilaktyka przeszczepów narządów*. PLZD. Warszawa. 2000
 - [5] Waszkiewicz Ł.: *Przechowywanie i transport narządów ludzkich przeznaczonych do przeszczepu*. Technika chłodnicza i klimatyzacyjna 5/2007. s.205–210
 - [6] Norman Dison: *Techniki transplantacyjne*. SKA. Katowice. 1998
 - [7] Transplant Proces. Przegląd Piśmiennictwa Chirurgicznego. 1999. s.2059-2104

Eleonora KRUGLENKO, Ilona KORCZAK, Barbara GAMBIN
**EFEKTYWNOŚĆ HIPERTERMII ULTRADŹWIĘKOWEJ
W AGAROWYCH WZORCACH TKANKI MIĘKKIEJ
DOMIESZKOWANYCH RÓŻNYMI SKŁADNIKAMI**

*Polska Akademia Nauk
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
e-mail: ekrug@ippt.pan.pl*

Streszczenie: W pracy zbadano wpływ na efektywność hipertermii ultradźwiękowej 3 typów wzorców agarowych domieszkowanych różnymi cząstkami. Cząstki były zrobione z dwóch różnych materiałów, mianowicie z grafitu i tlenku żelaza, o różnych rozmiarach i udziałach wagowych. Rozpatrzono dwa udziały wagowe 0.8% oraz 1.6% dla każdego typu badanego wzorca. Domieszki grafitowe były rozmiarów poniżej 20 mikrometrów, a użyte jako domieszki cząstki tlenku żelaza miały dwa rozmiary: około 50 mikronów i około 100 nanometrów. Wykonano szereg doświadczeń ogrzewania ograniczonej objętości próbek przez zogniskowaną wiązkę ultradźwiękową. Warunki naświetlania wiązką zapewniały izolację termiczną od nagrzewającej się głowicy nadającej wiązkę. Wiązka była nadawana z różnymi mocami i w czasie eksperymentu zmierzono zmiany temperatury wzdłuż osi wiązki przy użyciu termopar. Wykazano, że to rozmiary cząstek domieszkujących agarowy żel, a nie ich skład chemiczny decydują o wydajności grzania.

WSTĘP

Lokalna hipertermia, czyli podwyższenie temperatury tkanki w określonym miejscu do temperatury powyżej 40°C, spowodowana absorpcją dostarczonej z zewnątrz energii, jest wykorzystywana jako uzupełniająca terapia przy leczeniu nowotworów. Hipertermia może być wywołana przez naświetlanie tkanki skoncentrowaną wiązką ultradźwiękową lub zmiennym polem magnetycznym, jeśli struktura zawiera cząstki o właściwościach reagujących na to pole. Skuteczność ultradźwięków w zastosowaniu do hipertermii jako procedury medycznej może być znacząco poprawiona za pomocą domieszkowania tkanki poprzez dodanie do niej tak zwanych sonosensybilizatorów (środki uwrażliwiające), które mogą zwiększać efekt cieplny, czyli zwiększyć absorpcję ultradźwiękową. Procedury hipertermii powinny być wstępnie kalibrowane na wzorcach tankowych, czyli na materiałach tanko-podobnych, aby zapewnić bezpieczeństwo termiczne żywych tkanek, których temperatury nie chcemy podnosić. W przypadku hipertermii ultradźwiękowej materiały te powinny posiadać podobne do tkanek właściwości fizyczne, w szczególności powinny w podobny sposób tłumić i rozpraszać ultradźwięki.

W hipertermii magnetycznej wzrost temperatury wywołany jest działaniem zmiennego pola magnetycznego na nanocząstki, mające właściwości magnetyczne, na przykład, specjalnie przygotowane oraz biogodne nanocząstki magnetytu Fe_3O_4 [1], które umieszczone w wodzie mogą być bezpośrednio wstrzykiwane przez iniekcję do guza celem jego zniszczenia. Celem przedstawionej pracy jest zbadanie efektywności stosowania nanocząstek magnetycznych do hipertermii ultradźwiękowej w porównaniu do mikrocząstek magnetycznych oraz

do mikrocząstek nie posiadających właściwości magnetyczne. Inspiracją do przeprowadzenia badań była praca dotycząca możliwości jednoczesnego stosowania hipertermii magnetycznej i ultradźwiękowej [2].

MATERIAŁ

Do badań z wykorzystaniem ultradźwięków najczęściej są używane wzorce tkankowe na bazie żelu agarowego. Są one nie toksyczne, najprostsze w przygotowaniu, a domieszkowanie wzorców agarowych różnorodnymi dodatkami takimi, jak szklane kulki bądź cząstki grafitu daje możliwość sterowania właściwościami akustycznymi tych wzorców oraz zbliżenia do właściwości akustycznych różnorodnych tkanek żywych. [3, 4]. Ponieważ temperatura topienia agaru jest dosyć wysoka 88–90°C, agarowe wzorce tkanek miękkich również są przydatne w eksperymentach, związanych z hipertermią, [5].

W przeprowadzonym przez nas eksperymencie wykorzystano wyprodukowane agarowe wzorce tkanki miękkiej trzech typów: z domieszkowaniem mikro (MM) i nanocząstek (NM) magnetycznych odpowiednio o rozmiarach 50-100 μm oraz 50-100 nm oraz z dodatkiem mikrocząstek grafitowych (MG) o wymiarach 20 μm .

Dla wyprodukowania wzorców wykorzystano Agarose BIO STANDARD (Prona), demineralizowaną wodę oraz 0.5% środka konserwującego FEOG (Phenoxyethanol, Ethylhexylglycerin), który jest stabilny przy podwyższeniu temperatury do 120°C. Do wzorców dodano mikrocząstki grafitowe oraz nanocząstki Fe_3O_4 (Sigma-Aldrich), które otrzymaliśmy do celów badawczych od grupy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Poznańskiego, autorów szeregu prac o właściwościach fizycznych i akustycznych żelów agarowych domieszkowanych nanocząstkami [3], mikrocząstki tlenku żelaza (SELKAT, Polska). Zawartość wagowa agaru we wzorcach stanowiła 4,8%, dodawanych cząstek – 0,8% i 0,16%, co odpowiada koncentracji 8 i 16 mg/ml, por. [3].

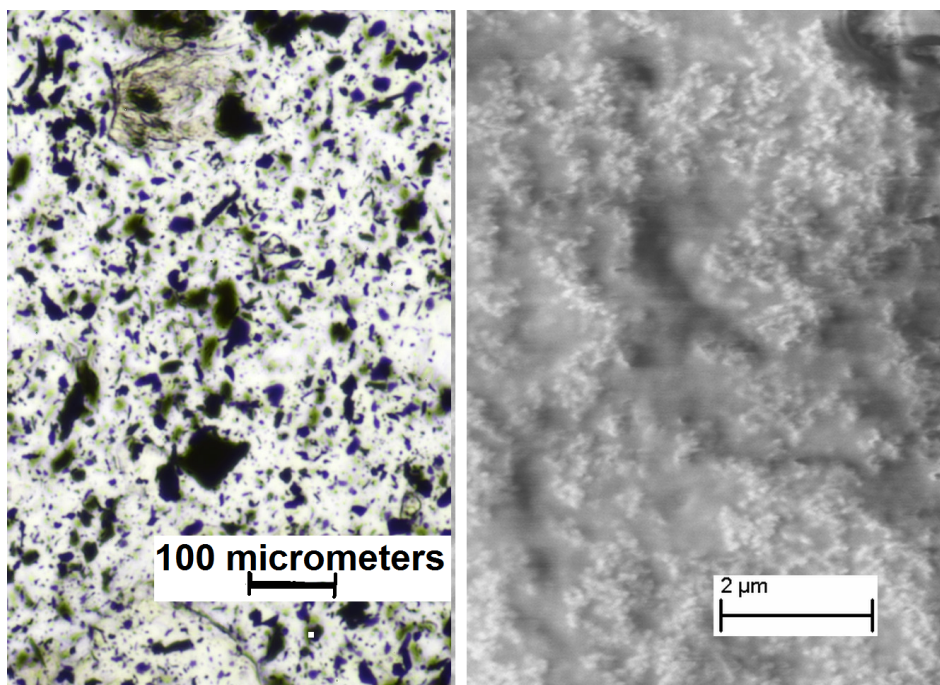


Rysunek 1. Zdjęcie wzorców agarowych z dodatkiem nanocząstek magnetycznych

Po nagraniu mieszanki w łaźni wodnej aż do całkowitego rozpuszczenia proszku agaru, opakowanie było umieszczone w myjce ultradźwiękowej z termoregulacją (Bandelin Sonorex

DT 52 H, Bandelin Electronics, Berlin). Proces nadźwiękowania mieszaniny miał służyć równomiernemu rozkładowi dodatków we wzorcu oraz miał zapobiegać ich osadzaniu się podczas tężenia żelu agarowego, następującego przy temperaturze około 40°C. Po osiągnięciu temperatury żelu 50°C przelewano zawiesinę do przygotowanego pojemnika z pleksi w kształcie cylindra o średnicy 44 mm i wysokości 40 mm. Po 24 g wzorce były wykorzystywane do eksperymentów, Rys. 1.

W wyniku serii eksperymentów zostały wyznaczone właściwości akustyczne tych wzorców. Wartości prędkości dźwięku we wzorcach mało się różniły pomiędzy sobą, były zbliżone do prędkości dźwięku w wodzie, która przy 20°C wynosi 1480 m/s. Natomiast wartość współczynnika tłumienia we wzorcach zmieniała się w zakresie od 0.2 do 0.6 dB/(MHz·cm), zależała od rodzaju dodawanych cząstek i ich stężenia, była podobna do wartości współczynnika tłumienia w tkankach żywych. Struktura wewnętrzna wykazuje fakturę związaną z wielkościami wtrąceń, Rys. 2.



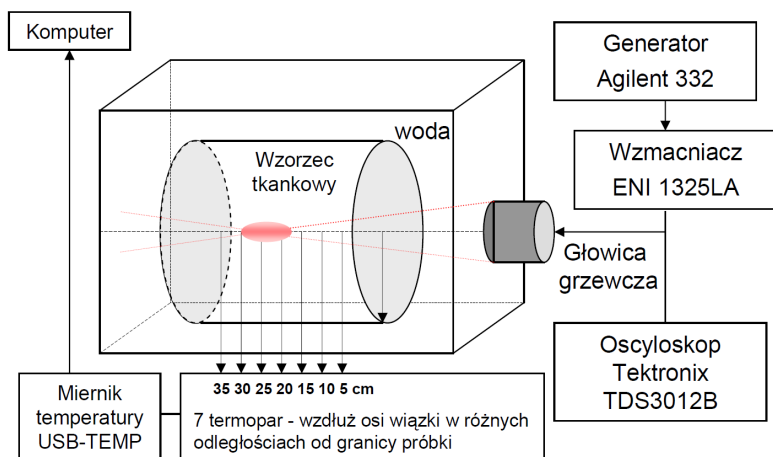
Rysunek 2. Na lewo struktura wzorca domieszkowanego grafitem, obraz z mikroskopu optycznego, widoczne są wtrącenia rzędu 1-20 mikrometrów (również większe skupiska). Na prawo – obraz SEM (skaningowy mikroskop elektronowy) nanocząstek tlenku żelaza o średnicach ok. 100 nm

EKSPERYMENT

Przeprowadzono szereg eksperymentów lokalnego nagrzewania wzorców z wykorzystaniem ultradźwięków oraz rejestracji temperatury z wykorzystaniem specjalnie zbudowanego

stanowiska pomiarowego, opisane w [7, 8]. Schemat eksperymentu pokazano na rys. 3. Wzorec tkankowy włożono do pojemnika z wodą współosiowo z ogniskującym przetwornikiem ultradźwiękowym w odległości 20 mm od niego. Układ grzewczy składał się z generatora Agilent 33250A (Colorado Springs, USA), wzmacniacza mocy ENI 3100LA (Rochester, NY, USA), oscyloskopu Tektronix TDS3012B (Beaverton, USA) oraz okrągłego przetwornika ultradźwiękowego o średnicy 44 mm, ogniskowej 44 mm, częstotliwości środkowej 2.2 MHz. Generatorem nadawano 20 impulsów o częstotliwości 2 MHz w ciągu 10 μ s, powtarzając każde 50 μ s (współczynnik wypełnienia impulsu 0.2).

Rejestracja temperatury odbywała się za pomocą specjalnego miernika temperatury USB – TEMP (Measurement Computing Corporation, Norton, USA) oraz siedmiu termopar – płaszczowych czujników temperatury typu TP-201K-1b-200-1,0 o średnicy 0.5 mm, rodzaj termoelementu płaszczowego K (NiCr-NiAl). Jednakowe procedury grzewcze były utrzymane dla wszystkich próbek. Każda próbka była naświetlana w ciągu 5 min wiązką ultradźwiękową różnej mocy od 1 W do 4 W. Pomiar temperatury odbywał się co 1 s w ciągu 5 min nagrzewania wzorca ultradźwiękami oraz następne 5 min podczas stygnięcia. Siedem termopar były ułożone wzdłuż osi grzewczej głowicy zaczynając z 5 mm od brzegu próbki co 5 mm, patrz Rys. 3.

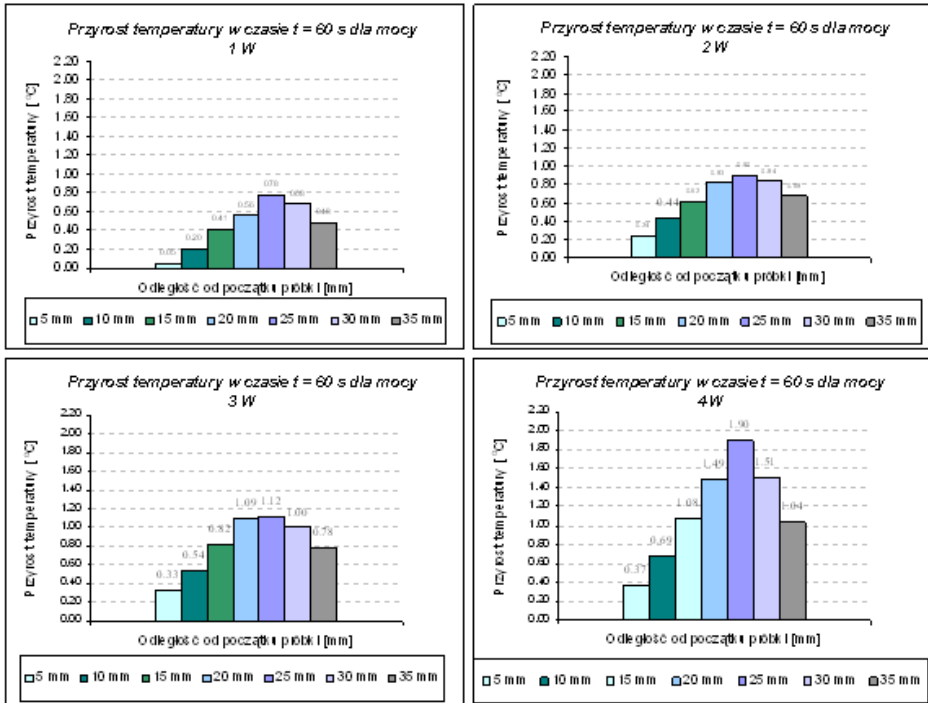


Rysunek 3. Schemat eksperymentu mierzenia temperatury we wzorcu tkankowym przez termopary i moduł USB-TEMP pod czas naświetlania jego ogniskującą wiązką ultradźwiękową

WYNIKI

Przy nagrzewaniu wzorców skupioną wiązką ultradźwiękową otrzymujemy niejednorodny wzrost temperatury wewnątrz próbki.

Porównując przyrosty temperatury w różnych punktach próbki wzdłuż osi wiązki w tym samym czasie, jak pokazano na Rys. 4 dla wzorca agarowego bez dodatków, można stwierdzić jakiego kształtu jest wiązka ultradźwiękowa.



Rysunek 4. Przyrosty temperatury po 60 s grzania dla próbki agarowej

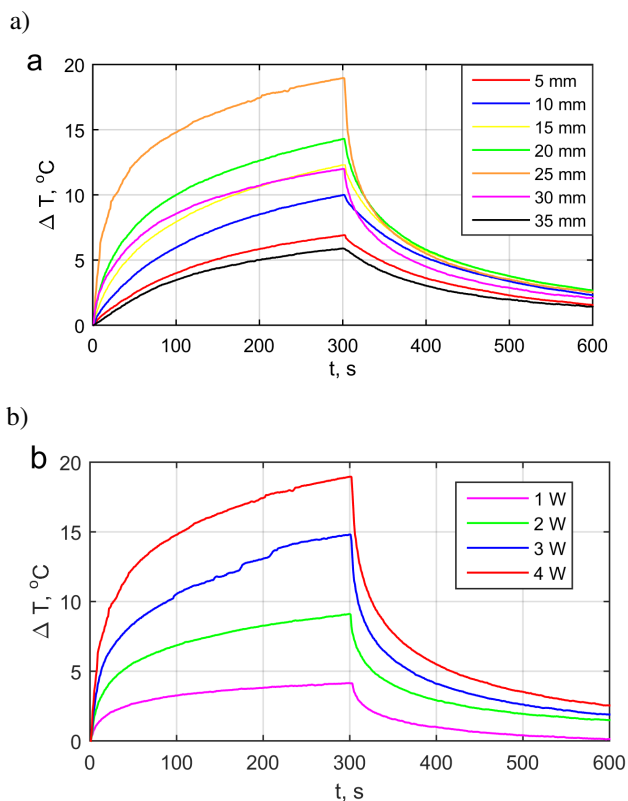
Na Rys. 5 pokazane wyniki pomiaru temperatury w próbkach na przykładzie wzorca agarowego z domieszkowanymi nanocząstkami magnetycznymi. Na Rys.5a pokazano zmiany temperatury zmierzone wzdłuż osi wiązki na różnej odległości od brzegu wzorca po 300 s nagrzewania ultradźwiękami oraz 300 s stygnięcia. Maksymalny wzrost temperatury w próbce zarejestrowano w punkcie na odległości 25 mm od granicy wzorca i wody, co odpowiada odległości 45 mm od nadajnika. To świadczy, że nie ma przesunięcia ogniska bliżej głowicy grzewczej (ogniskowa głowicy 44 mm), które ma miejsce, na przykład, przy naświetlaniu tkanki miękkiej. Na Rys. 5b porównano zmiany temperatury w tym samym punkcie, gdzie zarejestrowano maksymalny wzrost temperatury, mianowicie w odległości 25 mm od brzegu próbki, w zależności od mocy nadajnika dla zakresu 1 – 4 W.

W Tab. 1 porównano maksymalne przyrosty temperatury we wzorcach agarowych z różnymi domieszkami w zależności od nadanej mocy akustycznej. Wzrost temperatury pod wpływem ultradźwięków zaobserwowany we wszystkich wzorcach, przy tym najmniejszy – we wzorcu agarowym bez domieszek. Temperatura po nagrzewaniu ultradźwiękami we wzorcach z dodatkiem magnetytu była większa w porównaniu do temperatury we wzorcach

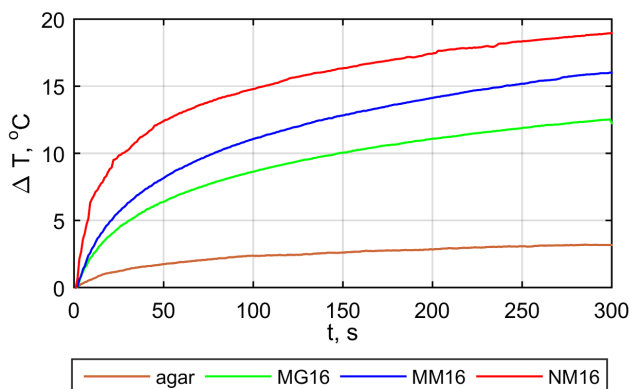
z dodatkiem grafitu. Największy wzrost temperatury zarejestrowany został we wzorcu z dodatkiem nanocząstek magnetycznych.

Tablica 1. Maksymalny przyrosty temperatury (w °C) we wzorcach po 5 min nagrzewania ultradźwiękami o różnej mocy

Rodzaj wzorca/ Moc grzania	1 W	2 W	3 W	4 W
agarowy	1.4	2.5	3.5	6
GM16	3.1	6.3	9.5	12.5
MM16	4.3	8.5	12.5	16.4
NM16	5	9	13.1	18



Rysunek 5. a) Zmiana temperatury w różnych punktach wzorca agarowego NM16 podczas naświetlania wiązką ultradźwiękową o mocy 4 W (po lewej; b) wzrost temperatury w odległości 25 mm od brzegu wzorca podczas naświetlania wiązką o mocach od 1 W do 4 W



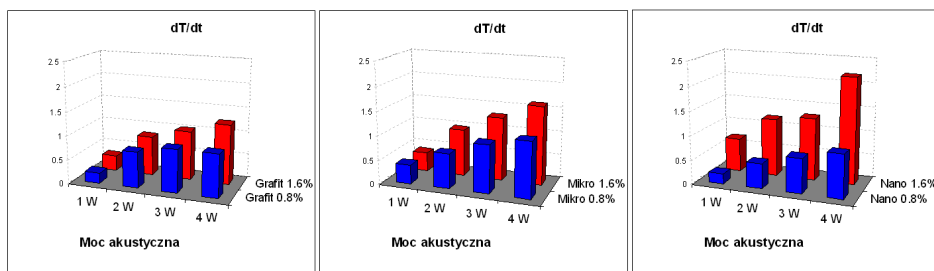
Rysunek 6. Porównanie wzrostu temperatury we wzorcach z różnymi dodatkami podczas nadźwiękowania wiązką ultradźwiękową o mocy 4 W

Miarą efektywności hipertermii jest tzw. współczynnik absorpcji właściwej (ang. *specific absorption rate, SAR*):

$$SAR = c_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

gdzie wartość c_p oznacza ciepło właściwe, $\frac{dT}{dt}$ – szybkość wzrostu temperatury w początkowej chwili czasu.

Na Rys. 7 porównano szybkość wzrostu temperatury we wzorcach przy różnej stosowanej mocy akustycznej.



Rysunek 7. Porównanie szybkości wzrostu temperatury we wzorcach z różnymi dodatkami oraz różnymi mocami

WNIOSKI

Analiza zarejestrowanych danych pomiarowych pokazała, że najefektywniejszym dodatkiem do agarowych wzorców przy hipertermii ultradźwiękowej wśród badanych typów do-

mieszek są nanocząstki tlenku żelaza w ilości 1.6% wagowego. Przy mniejszej ilości domieszek, 0.8% wagowo, temperatura rośnie szybciej we wzorcu z mikrocząstkami magnetycznymi. Ich obecność nanocząstek wpływa mocniej na wzrost temperatury podczas działania ultradźwięków, niż obecność domieszek z mikronowych cząstek z tego samego materiału lub grafitu tylko jeśli ich ilość jest dostatecznie duża. Przy założeniu znajomości ciepła właściwego każdego składnika możemy policzyć współczynnik absorpcji właściwej (SAR) i będzie on również największy dla materiału zawierającego nanocząstki.

Udowodniono więc, że nanocząstki są bardziej skutecznymi „uczulaczami” termicznymi, niż mikrocząstki, o ile ich ilość przekroczy 1.6% wagowo w materiale wzorca. Dzięki dokładności odczytu szybkości zmian temperatury przy różnych mocach wiązki nadawczej i różnych udziałach wagowych domieszek pojawiła się możliwość wykalibrowania współczynnika absorpcji właściwej jako wielkości charakteryzującej dany materiał próbki. Będzie to tematem dalszych prac. Wykazano, że istotnie różnią się materiały z mikrocząstkami od materiału z nanocząstkami i ta różnica jest większa, niż różnica pomiędzy materiałem z mikrocząstkami grafitu i materiałem z mikrocząstkami magnetycznymi, dla udziałów wagowych 1.6%.

Podziękowania

Dziękujemy zespołowi z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Poznańskiego, w szczególności profesorowi Arkadiuszowi Józefczakowi za konsultacje i ciec magneyczną, która wykorzystaliśmy do przeprowadzonych badań.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Périgo E. A., Hemery G., Sandre O., Ortega D., Garaio E., Plazaola F., and Teran F. J., Fundamentals and advances in magnetic hyperthermia, *Applied Physics Reviews* 2, 041302, 2015. DOI: 10.1063/1.4935688
- [2] Józefczak A., Kaczmarek K., Hornowski T., Kubovčiková M., Rozynek Z., Timko M., Skumiel A., Magnetic nanoparticles for enhancing the effectiveness of ultrasonic hyperthermia *Applied Physics Letters*, 108, 263701, 2016. DOI: 10.1063/1.4955130
- [3] Józefczak A., Kaczmarek K., Kubovčiková M., Rozynek Z., Hornowski T., The effect of magnetic nanoparticles on the acoustic properties of tissue mimicking agar/gelatin phantoms, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 431, 172-175, 2017
- [4] Madsen E.L., Frank G.R., Dong F., Liquid or solid ultrasonically tissue-mimicking materials with very low scatter, *Ultrasound in Medicine & Biology*, 24(4):535–42, 1998.
- [5] Madsen E.L., Frank G.R., Tissue-mimicking agar/gelatin materials for use in heterogeneous elastography phantoms, *Physics in Medicine & Biology*, 50, 23, 5597-5618, 2005 DOI: 10.1088/0031-9155/50/23/013.
- [6] Menikou G., Damianou C. Acoustic and thermal characterization of agar based phantoms used for evaluating focused ultrasound exposures *Journal of Therapeutic Ultrasound*, 5, 14, 2017, DOI: 10.1186/s40349-017-0093-z
- [7] Gambin B., Kujawska T., Kruglenko E., Mizera A., Nowicki A., Temperature Field Induced by Low Power Focused Ultrasound on Soft Tissues During Gene Therapy. Numerical Predictions and Experimental Results. *Archives of Acoustics*, 34, 4, 445-459, 2009.

-
- [8] Kujawska T., Secomski W., Kruglenko E., Krawczyk K., Nowicki A., Determination of Tissue Thermal Conductivity by Measuring and Modeling Temperature Rise Induced in Tissue by Pulsed Focused Ultrasound, PLOS ONE, ISSN: 1932-6203, Vol.9, No.4, pp.e94929-1-8, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0094929

Część IV

Metody fizyczne w biomedycynie

*Henryka CZYŻ**, *Tadeusz JASIŃSKI**, *Andrzej WŁOCH***

PHYSICAL BASIS OF MR–HIFU ULTRASONIC METHOD FOR MYOMAS TREATMENT

*Rzeszow University of Technology,
Faculty of Mathematics and Applied Physics,
*Department of Physics and Medical Engineering
**Department of Mathematical Modeling
e-mail: hczyz@prz.edu.pl*

Abstract: The aim of the work is to analyze the physical basis of an innovative method of treatment using the focused HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) ultrasonic wave to destroy selected areas of cells. The concentrated HIFU ultrasound beam was used for the first time already in the middle of the twentieth century, but the development of this methodology of treatment developed much later. Currently, this method, called ultrasound thermoablation, has been successfully used in many medical centers around the world, including the removal of uterine fibroids. The essence of thermoablation is based on directing the HIFU beam to the affected area. The focused beam penetrates through the skin surfaces, does not affect their structure, concentrating in the target place. In cells, as a result of sonification, there is a significant increase in temperature caused by the absorption of ultrasonic energy. The consequences of increasing the temperature are tissue coagulation, i.e. necrosis due to dehydration, protein denaturation and lipid melting. An additional effect causing the destruction of tumors is cavitation. The final effect of sonication is the total destruction of a diseased cell. The beam can heat the area with specific dimensions at a time. If the change is greater, it requires multiple sonication. Cell warming is monitored in real time, which allows precise control over the performed procedure. This provides patients with comfort and a sense of security. This solution allows the integration of the HIFU and magnetic resonance methods. Readings of particular parameters, primarily temperature, allow optimization of the beam being sent. This innovative solution allows non-invasive removal of myomas, which prevents patients from being deprived of having a child (as in the case of surgery).

INTRODUCTION

Ultrasounds due to the specificity of interactions with matter are widely used in technology and medicine [15]. Physical phenomena induced by ultrasounds with appropriate parameters can lead to thermal effects in biological tissues [11]. The physical basis of the innovative method in which the ultrasound wave is used for the treatment of uterine fibroids was analysed. The focused HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) [7] is used for the non-invasive destruction of the pathologically changed cells. For the first time, such concentrated HIFU ultrasonic beam was used in the middle of the 20th century, however, the development of this methodology of treatment developed only in later years. This method of treatment which is called an ultrasonic thermal ablation is now successfully used worldwide in many medical centres to remove uterine fibroids. The essence of thermal ablation is to direct the HIFU beam onto pathologically changed cells. As a result of sonification, the temperature of these cells rises due to absorption of the ultrasound wave energy. In turn, the rise of temperature causes coagulation in body tissues, i.e. necrosis. In addition, ultrasonic cavitation causes

the destruction of tumours. The final effect of sonification is a complete destruction of the pathological cell. Heating the cells is monitored in real time, which allows for precise control over the performed procedure. This provides patients with comfort and a sense of security through integration of the HIFU method with magnetic resonance imaging (MR) [6]. This innovative solution allows non-invasive removal of fibroids without taking young women's chance of having children away (as it is in case of a surgery).

UTERINE FIBROIDS, CHARACTERISTIC OF DISEASE

What causes them

Uterine fibroids are non-malignant neoplasm in the form of benign tumours. They develop slowly for a long period of time without metastasis nor causing any symptoms. The disease develops in women more often when they reach the menopause. A systematic check is necessary since it allows to assess whether a tumour becomes malignant or not. Aetiology of the disease has not been fully understood. There is, however, a group of factors which enable the formation of uterine fibroids and those are:

- hormonal disorders;
- the body's chemical balance disorder;
- genetic changes [8].

Symptoms

In most cases, fibroids do not cause clinical signs but they are often the reason behind unpleasant ailments which include:

- pressure on the bladder or other organs
- painful menstruations
- abnormal genital bleeding
- pain and discomfort
- fertility disorder, miscarriages.

Fibroids can occur as single or multiple tumours which cause the uterus to grow. The size of these tumours ranges between the smallest that are difficult to detect and the big ones with several centimetres in diameter. The biggest tumour was recorded in 1888. It weighed 140 pounds (approx. 63 kg) [8].

Treatment methods

If the fibroids are not accompanied by symptoms, they should only be regularly checked as not all of the diagnosed fibroids undergo treatment. Symptomatic fibroids should be treated. There are three main treatment methods:

1. surgical treatment;
2. pharmacological treatment;

3. minimally invasive methods.

Surgical treatment mainly includes the excision of a tumour or uterus [13]. Depending on the extent of a tumour, the body of the uterus or the entire uterus is removed. Surgical methods are connected with a large blood loss, complications, hospitalisation as well as permanent infertility. Indications for surgical treatment:

- fibroids with clinical symptoms;
- large in size (when the total size of fibroids corresponds at least to a 14-week pregnancy);
- fibroids that show a high growth tendency in a short observation time or during hormonal treatment;
- mental discomfort [14].

Uterine fibroids are dependent on hormones. Taking the right medication causes the reduction in the size of a tumour even by half, inhibition of bleeding, reduction of pain and improvement of the quality of life. Minimally invasive methods include, but are not limited to, an ultrasound therapy under magnetic resonance. The use of ultrasounds to treat fibroids was approved by the FDA (Food and Drug Administration) in 2004. This treatment method guarantees the preservation of the whole organ without having to undergo a surgery as well as without using general anaesthesia. The procedure is monitored in real time by nuclear magnetic resonance. This enables the exact location of fibroids and to monitor the procedure as well it enables to assess the post–procedure treatment.

THERMAL ABLATION DEVICE

Magnetic resonance imaging

HIFU method uses a focused high energy ultrasonic wave on the exact tumour location. It causes a thermal effect in the tissue and consequently its destruction. Apart from that, gas bubbles can occur in the tissue and can break its structure. Under the MR (MR–HIFU) image control, the ultrasonic thermal ablation is for monitoring the patient’s temperature changes during sonification with a magnetic resonance apparatus [18]. MR images are used to calculate thermal map data that are used to visualize the development of treatment and to control the duration of sonication. NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*) is imaging based on the nuclear magnetic resonance phenomenon [16]. The phenomenon of NMR allows for the mapping of the examined structures, thanks to the use of the interaction of matter that builds the human body with the magnetic field. It is primarily possible thanks to the large water content in the human body.

Nuclei of hydrogen atoms (protons) are elementary particles with an electric charge. After placing them in a constant magnetic field, they set up along the field lines, therefore they become magnetised. Registered signals in the nuclear magnetic resonance come from the atomic nucleus. Nuclei have specific masses, electric charges, spin and magnetic moment. The nuclear magnetic moment plays a key role because its interaction with the electromagnetic wave constitutes the basis of magnetic resonance imaging [6]. The simplest and the most widespread nucleus in nature is the hydrogen nucleus that has the largest magnetic moment [12] of all stable isotopes. Nuclei with an electric charge spin around their axis, thus they

have their own magnetic field. These nuclei can be compared to small magnets. When there is no external magnetic field, i.e. the magnetic induction $B_0 = 0$, the orientation of the spinning nuclei is arbitrary. The relationship between the external magnetic field induction B_0 and its field strength is as follows: $B_0 = \mu H_0$, where μ – magnetic permeability of the medium (factor) and H_0 – the value of the intensity of the external magnetic field. Atomic nuclei which rotate around their own axis also have an angular momentum called spin, marked with I . The spin value depends on its spinning speed and is a typical characteristic of a nucleus. Values of spins for selected atomic nuclei can be found below:

- for hydrogen ^1H , $I = \frac{1}{2}$,
- for an isotope of hydrogen ^2H (deuterium, one more neutron in the nucleus), $I = 1$,
- for carbon ^{12}C , $I = 0$,
- for oxygen ^{16}O , $I = 0$.

It should be noted that NMR only occurs with nuclei that have a non-zero spin. Nucleus placed in a uniform magnetic field with the induction of $B_0 \neq 0$, shows the precession movement. The cause of precession is the vector of the moment of magnetic force which acts on the angular momentum vector. Summing of angular momentums and magnetic moments of protons and neutrons can lead to their complete compensation (equilibrium). The vector of magnetic force is equal to:

$$\vec{\mu}_L \times \vec{B}_0 \quad (1)$$

where: $\vec{\mu}_L$ is the magnetic moment of the proton, \vec{B}_0 is the magnetic induction of the external field. The value of the magnetic force is equal to:

$$\mu_L \cdot B_0 \cdot \sin \angle (\vec{\mu}_L, \vec{B}_0) \quad (2)$$

The direction of the magnetic force is perpendicular to the $\vec{\mu}_L$ and \vec{B}_0 vectors, and the orientation is determined by the right-hand screw rule. Figure 1 shows the precession of the magnetic moment in a magnetic field of induction.

Between the values of the angular momentum L and magnetic moment $\vec{\mu}_L$ there is a dependency:

$$\mu_L = \gamma L \quad (3)$$

Where γ is the nuclear magnetogyric factor. This is a constant depending only on the type of nucleus. By using a vector, this formula can be written:

$$\vec{\mu}_L = \gamma \vec{L} \quad (4)$$

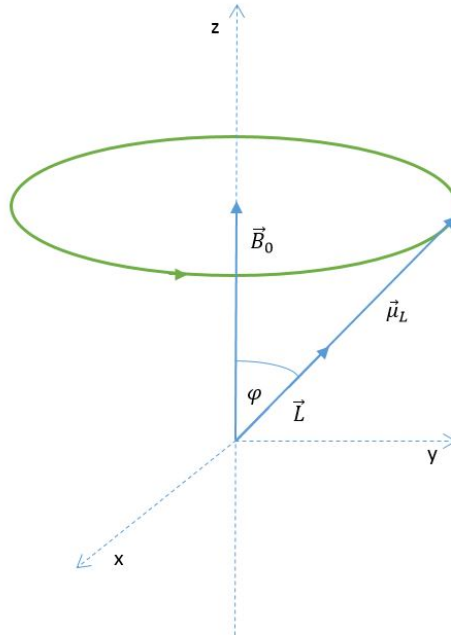


Figure 1. The precession of the magnetic moment $\vec{\mu}_L$ in a magnetic field of induction \vec{B}_0

Precession rate, known as the Larmor frequency is directly proportional to the field induction and is equal to:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (5)$$

Indicator 0 stands for the fixed value of induction and its corresponding frequency of Larmor precession. This is the basic equation used in NMR phenomenon.

The classic image of the resonance phenomenon

An electromagnetic wave can be described as propagating electrical \vec{E} and magnetic \vec{B} field disturbances (which are mutually perpendicular). The electrical component \vec{E} of the electromagnetic wave is not significant in resonance. The electromagnetic wave works in such a way so that the magnetic vector of the wave \vec{B}_x was perpendicular to the field \vec{B}_0 and it changed in time along the x -axis in accordance with the equation:

$$\vec{B}_x = 2\vec{B}_1 \sin \omega t = \vec{B}_1 \cos \omega t + \vec{B}_1 \cos(-\omega t) \quad (6)$$

To a changing field along the x -axis, one can assign two fields with amplitudes of \vec{B}_1 that spin in the opposite directions with frequency ω , Fig. 2.

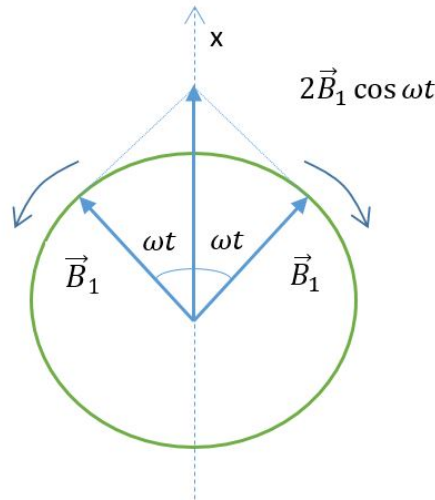


Figure 2. The changing field along the x -axis can be assigned two fields with amplitudes \vec{B}_1 rotating in opposite directions with the frequency ω

Magnetic field \vec{B}_1 that spins in the xy plane can cause the vector of the magnetic moment $\vec{\mu}_L$ to be reversed. The frequency ω of magnetic field \vec{B}_1 should be equal to the frequency ω_0 of the Larmor precession of the magnetic moment $\vec{\mu}_L$. The condition of equal frequency $\omega = \omega_0$ is the condition for resonance. Vector \vec{B}_1 should form a 90° angle with the vector $\vec{\mu}_{L,xy}$ meaning with a $\vec{\mu}_L$ projection on the xy plane. Then the influence of field \vec{B}_1 is the most effective and strongest.

The microscopic sample showing the resonance, contains a large number of nuclei, each with a magnetic moment $\vec{\mu}_L$. After turning the field \vec{B}_0 on (direction and orientation of z -axis), the balance of nuclei becomes determined in the sample.

This means that a numerical advantage of $vec\mu_L$ moments parallel to the direction of the magnetic field will occur. There will now be a macroscopic magnetization of \vec{M}_z in the direction of the z -axis, it is marked at equilibrium \vec{M}_0 . The magnetization value of the \vec{M}_0 vector is determined by the prevalence of $\vec{\mu}_L$ set parallel to the field direction.

Resonance phenomena from the quantum perspective

In quantum mechanics, according to the de Broglie hypothesis, the elementary particles are assigned with a corpuscular wave structure. This means that each particle is bound to a wave. Each wave, on the other hand, can be considered as a set of particles, for example, an electromagnetic wave as a set of photons. The electromagnetic wave with the wave frequency f_0 is a set of quanta with energies:

$$E = hf_0 \quad (7)$$

$$E = h \frac{\omega}{2\pi} = \frac{h}{2\pi} \omega \quad (8)$$

Where $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. So eventually the quantum energy is expressed by the formula: $E = \hbar\omega$, where h is the Planck's constant. In a constant magnetic field \vec{B}_0 the particle endowed with a spin value $I = \frac{1}{2}$ can take one of two positions relative to the field: in accordance with the field or counter to the field; the energy of the particles in these states is different. If in a constant magnetic field with the induction of \vec{B}_0 a sample of matter is placed, then the casting of energy states by the magnetic moments of nuclei $\vec{\mu}_L$ will be uneven. Resonance conditions are:

- an uneven casting of the states,
- equal quantum wave energy $E = hf_0$ and the difference in energy levels $\Delta E = \gamma\hbar B_0$:

$$hf_0 = \gamma\hbar B_0 \quad (9)$$

and after the transformation we finally obtain:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (10)$$

- The first condition of resonance in quantum: If the quantum energy E is equal to the energy difference of energy levels $\Delta E = \gamma\hbar B_0$, then the resonance occurs, that is the partial absorption of the waves which means the transfer of waves energy to the hydrogen nuclei.
- The second resonance condition: In the process of the nuclei passing from the ground state to the excited state, the energy of the wave is absorbed by the hydrogen nuclei.

There can also be reverse transitions, the so-called enforced. Then the energy is sent from the nuclei and is passed to the wave. Since the lower level is occupied more frequently, the energy of the wave is absorbed by the nuclei and this means the occurrence of resonance. Hence it seems that resonance will occur when the frequency of the applied electromagnetic wave is exactly equal to the frequency Larmor precession. The resonance frequency f_0 is in the range of short RF (*Radio Frequency*).

The relaxation times and their importance in tomography

The relaxation time informs how fast the system of nuclear spins from the disturbed energy levels will return to equilibrium. The state of disturbed energy levels is caused by the energy absorption of radio waves in resonance. The phenomenon of relaxation consists in transferring excess energy from the spin system to the environment. The process of relaxation is not immediate. This is due to the interaction: spin-net and spin-spin.

- The spin-net interaction decides about the return of the component of the \vec{M}_z magnetisation vector from the current M_z value to the value of the initial state, i.e. M_0 .
- The spin-spin interaction determines the return of the component of magnetisation vector \vec{M}_{xy} from the value of maximum M_{xy} to zero.

The return of the component \vec{M}_z to the initial state is described with T_1 parameter and is called the longitudinal relaxation time. The return of the \vec{M}_{xy} component to zero is described with parameter T_2 and is called the transverse relaxation time. Relaxation times T_1 and T_2 are important in MR tomography. Different diseases of organs and tissues differ in the value of relaxation times. Summary of T_1 and T_2 relaxation times for varied tissues can be found in the Table 1.

Table 1. Relaxation time values T_1 and T_2 for varied tissues [10]

Organ / tissue	T_1 [ms]	T_2 [ms]
Fat tissue	240–250	60–80
Liver	490	40
Kidneys	650	60–75
Muscles	860–900	50
Oxidized blood	1350	200

Extended relaxation time T_1 is characteristic for cerebrospinal fluid as well muscles and articular surfaces. In the MR picture, these structures are dark. By contrast, fat tissues have short T_1 , therefore, in magnetic resonance image, they are bright, almost white. Because the relaxation times are the decisive parameter that differs the anatomical structures and the various pathological states, for better enhancement special contrast substances (shading) are applied.

Magnets used in magnetic resonance

Magnets used in RM can be divided into three groups [5]:

- permanent,
- resistance,
- superconducting.

The most commonly used magnets are superconducting magnets that have coils made of superconducting material, e.g. niobium and titanium alloy. The winding is permanently in liquid helium at the temperature of 4K (-269 °C). Under these conditions, their resistance is 0 [Ω]. Once specified current to the coil and then disconnected from the power supply flows in the coil without loss of energy, creating a constant magnetic field. The magnetic field of magnets can adversely affect the operation of electronic equipment. Therefore, the MR system is placed in a special room known as a Faraday cage that provides the required attenuation.

Magnetic field gradients

They diversify the induction of \vec{B}_z inside an object which undergoes imaging. Relevant differentiation of the magnetic field and radio waves allow meeting the resonance conditions [16]. The dependence of $\omega = \gamma B$ guarantees that if individual elements of the tested object are provided with different B (field gradient), then the MR signals from individual tested elements will differ with the resonance frequency ω . This enables to represent each element in the form of spatial distribution. Modern impulse methods use short field impulses known colloquially as radio impulses [16]. Most often, radio frequencies in the range from 16 MHz to 1 GHz are used. For protons present in hydrogen 1H placed in the magnetic field $B = 1$ T, the radio pulse has a frequency of about 40 MHz.

Aspects of patient and staff safety during the MR tests

Physical factors in the MR studies are [5]: permanent and gradient magnetic fields and electromagnetic waves. Magnetobiology is a branch of physics which researches the impact of interactions of magnetic fields on living organisms. Various effects of interactions of magnetic fields on living organisms are observed, however in terms of induction of fields and time of interaction that are used in MR tomography, these effects are not harmful, they do not pose such a threat as an ionizing radiation.

ULTRASONIC THERMAL ABLATION TABLE

Thermal ablation table

Ultrasonic thermal ablation table, Fig. 3, is the whole system of cooperating elements that include [18]:

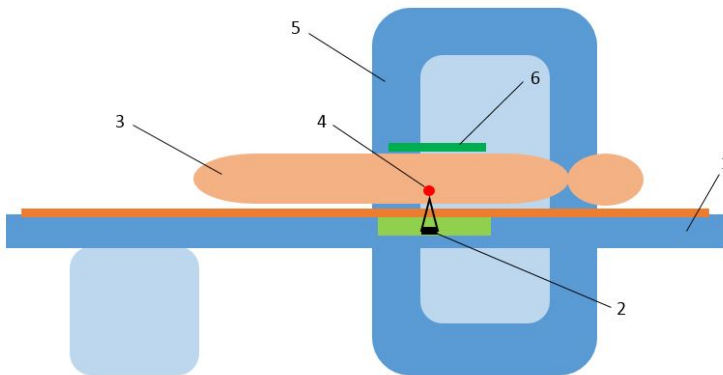


Figure 3. Ultrasonic thermal ablation table: 1 – ablation table, 2 – ultrasonic transducer, 3 – patient, 4 – myoma, 5 – magnetic resonance imaging, 6 – ultrasonic transducer

- ultrasonic transducer
- the positioning mechanisms, i.e. a whole range of mattresses, washers used to immobilise the patient during the procedure
- a panel of connectors in the patient's table that allows connecting the table to resonance
- gradient coil
- emergency stop button for the patient
- a device for direct cooling of the skin.

Conductive acoustic waves fluid

Conductive fluid is intended to remove the air from the contact line skin – ultrasonic transducer. For this purpose, distilled water or a mixture of water with gel is used. The water must meet certain criteria which include:

- pure and distilled water without microbiological substances,
- a high content of minerals (the use of hard water is not allowed),
- the absence of substances that could interfere with the quality of the resonance signal.

Air bubbles located on the beam path can cause adverse phenomena that include, *inter alia*, a local temperature rise or a reflection of the beam. This is why the fluid must be degassed so that it will be impossible for the formation of bubbles [4].

Device for direct cooling of the skin

This device serves to cool the patient's skin during treatment by the HIFU method. In the sonication process, the temperature rise, to a certain extent, occurs in all layers of tissues that are in the path of the ultrasound beam. After each sonication, cooling occurs to prevent any tissue burns in the area located near the path of the ultrasound wave. Chilled water circulation is applied inside the part of the device that has contact with the patient's skin, therefore keeping the water temperature at the certain level. Cooling starts automatically when the therapy begins [18]. Accumulation of heat within the skin and adipose tissue is particularly dangerous due to the possibility of serious skin burns. The software helps to prevent this situation through continuous monitoring of the temperature in the near-treatment area during the entire procedure. If there is a risk of skin burns, the system will not allow the sonication to begin.

PHYSICAL PHENOMENA ACCOMPANYING THE ULTRASOUND THERMAL ABLATION TREATMENT

Ultrasound wave energy absorption in a real environment

In the process of the interaction of ultrasounds with the matter, some energy is absorbed and transformed into heat [11]. As a result of this process, the temperature rise depends on:

- the amount of absorbed energy, and thus the intensity of ultrasounds,
- their frequency,
- the specific heat of the medium and
- on the dynamic equilibrium between the accumulation and distribution of heat.

Absorption is the process of taking in ultrasound wave energy by the physical bodies. As a result of absorption, the wave energy passing through the body is reduced, thus causing an increase in the internal energy of the body, i.e. a rise in temperature. The attenuation increases with the vibration frequency which means that the waves of higher frequencies are more strongly suppressed. The amount of energy loss is determined by using the energy

damping factor α . By using it, the intensity of the I_x ultrasound wave that propagates in a solid as a function of distance can be defined [17]:

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha\omega x} \quad (11)$$

where: I_x – the intensity of the wave after passing the x distance, I_0 – the intensity of the output wave. The relative wave intensity as a function of distance is:

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-2\alpha\omega x} \quad (12)$$

The damping factor value rises as the wave frequency increases.

On Figures 4a,b there are shown the changes in relative wave intensity I_x/I_0 as a function of distance for adipose and muscle tissue for the frequencies used in the ultrasound thermal ablation, i.e.: 1,2 MHz and 1,4 MHz.

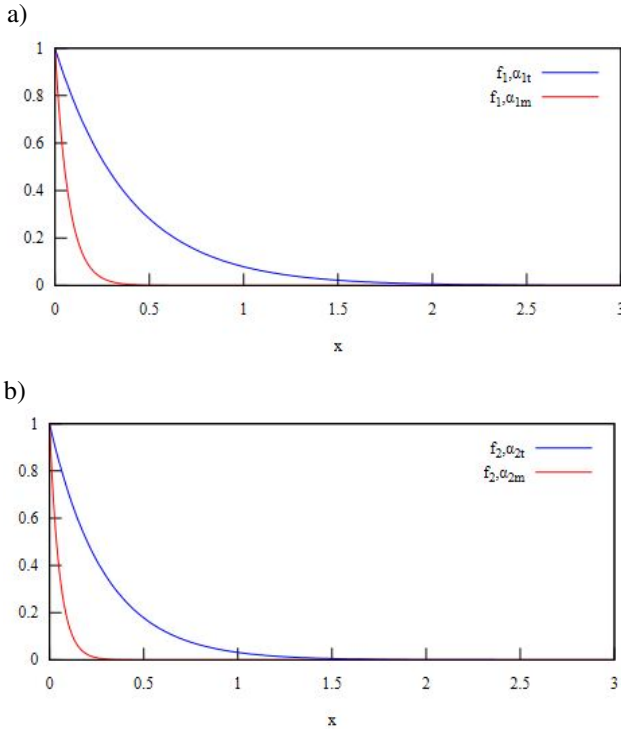


Figure 4. The relative intensity of ultrasound waves as a function of the distance of adipose and muscle tissue: a) for frequencies $f_1 = 1.2$ MHz and for absorption coefficients $\alpha_{1t} = 0,168$, $\alpha_{1m} = 0,912$ b) for frequencies $f_2 = 1.4$ MHz and for absorption coefficients $\alpha_{2t} = 0,196$, $\alpha_{2m} = 1,064$

Figures 5a,b,c show the dependence of the half-distance [17] on the frequency of the ultrasonic wave for muscle and fat tissues.

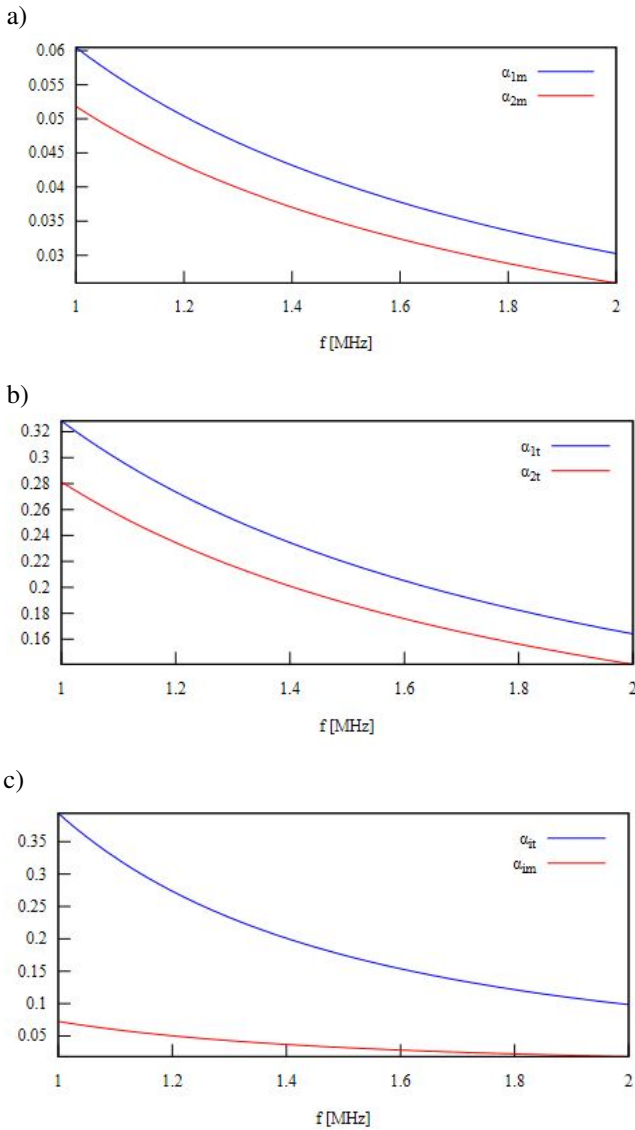


Figure 5. Half-distance as a function of the frequency of ultrasound wave: a) for muscle tissue, absorption coefficients $\alpha_{1m}=0,912$ and $\alpha_{2m}=1,064$ b) for fat tissue, absorption coefficients $\alpha_{1t}=0,168$ and $\alpha_{2t}=0,196$ c) absorption coefficients α_t and α_m – interpolated linear function

Ultrasonic cavitation

The phenomenon of ultrasonic cavitation in a liquid is based on the formation of pulsating vacuum bubbles or bubbles filled with saturated steam or a gas dissolved in a liquid. These

are formed as a result of local breaks in the medium under the influence of high–intensity waves [1]. Cavitation bubbles can grow, pulsate or collapse during the phase of wave compaction. A necessary condition for the cavitation to occur is reaching and exceeding the ultrasound intensity threshold, i.e. cavitation threshold [2]. This value depends on the type of fluid, the wave frequency and the presence of impurities in the fluid. Cavitation bubbles under the influence of the ultrasound field increase their radius and then they rapidly collapse [3]. The collapse of cavitation bubbles is accompanied by the release of large amounts of energy that is then dispersed in a very small volume. It is connected to the local temperature and pressure increase and it causes the destruction of biological structures [9]. The phenomenon of cavitation causes the destruction of cellular and tissue structures. In thermal ablation, cavitation is an unwanted phenomenon because there is no way to control it. It can affect the accuracy of temperature monitoring and image quality. In the data from the manufacturer, there is an information about the possibility of cavitation near 600 kHz – 700 kHz, with a frequency of sonication respectively: 1.2 MHz, 1.4 MHz. In the case of noticing the phenomenon of cavitation, the treatment must be stopped immediately.

CONCLUSIONS

This paper provides an overview to the physical basis of an innovative method of treatment of uterine fibroids which is successfully used in many medical centres worldwide as well as in Specialist Hospital Pro–Familia in Rzeszow, the first in Poland and central–eastern Europe. As a result of the cooperation, the necessary information about the ultrasound thermal ablation was obtained.

In conclusion, the ultrasound thermal ablation relies on using a high power ultrasound beam that heats a tumour to the right temperature thus coagulating the tissue, i.e. process of protein clotting and destruction of cancerous tissue. Under the influence of ultrasounds, cancer significantly reduces its size after some time. This treatment is monitored in real time using temperature maps created by magnetic resonance. It allows the possibility to find the exact location of a tumour and monitor the temperature directly at the fibroid. This gives the patients a sense of security. With this therapy, the preservation of the entire organ without surgery and general anaesthesia is assumed. The biggest advantage of this type of therapy is the fact that the assessment of the treatment occurs right after the entire procedure. Adverse events, as well as contraindications for the procedure, must be noted. Ultrasound thermal ablation brings certain risks. During the treatment, patients may experience slight pain. Reported adverse events were transient and by careful planning of treatment, it is possible to avoid them. The list of such adverse events is included in the manual from the manufacturer. The table lists the most frequent adverse events that occur during the treatment with the HIFU method.

Further research on the physical phenomena and mechanisms of ultrasounds on a human body is justified as thanks to modern design the ultrasound apparatus and its proper application can minimise the risks caused by their unwanted effects.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Ashokkumar M., The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), pp. 864–872, 2011.
- [2] Brujan E.A., Collapse of cavitation bubbles in blood. *Europhysics Letters*, 50(2), pp. 175-181, 2000.
- [3] Coussios C.C., Roy, R.A., Applications of acoustics and cavitation to noninvasive therapy and drug delivery. *Annual Review of Fluid, Mechanics*, 40, pp. 395-420, 2008.
- [4] Czyż H., Markowski T., Applications of dispersed phase acoustics, *Archives of Acoustics*, Polish Academy of Sciences, Warszawa, vol. 31, No 4, s. 59 – 64, 2006.
- [5] Hryniewicz A. Z., Rokita E., *Physical methods of medical diagnosis and therapy*, (in Polish) WN PWN, Warszawa 2013.
- [6] Kennedy, J.E., High-intensity focused ultrasound in the treatment of solid tumours. *Nature Reviews-Cancer*, 5(4), pp. 321-327, 2005.
- [7] Kozaczka E., G. Grelowska, Focusing acoustic sources, *Acustica-Acta Acustica*, Vol.91, 1, 153-155, 2006.
- [8] Markowska J., *Female screw*, (in Polish), MedPharm Poland, Wrocław 2008.
- [9] Mingxi Wan, Yi Feng, Gail ter Haar, *Cavitation in Biomedicine*, Springer 2015.
- [10] Naehle C.P., Strach K., Thomas D.: Magnetic resonance imaging at 1.5-T in patients with implantable cardioverter – defibrillators; *JACollCardiol* 54(6): 549-55, 2009.
- [11] Nowicki A., *Ultrasonounds in medicine. Introduction to ultrasonography*, (in Polish), IPPT, PAN, Warszawa, 2010.
- [12] Rummeny E. J., Reimer P., Heindel W., *Body imaging by magnetic resonance*, (in Polish), Med – Media, Warszawa 2010.
- [13] Smagowska B., Pawlazyk – Łuszczzyńsk M., Effects of ultrasonic noise on human body – a bibliographic review, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, No. 2, 2013.
- [14] Szkodziak P., Medical technologies used in the treatment of uterine fibroids, *European Journal of Medical Technologies*, 3 (4), 2014.
- [15] Śliwiński A., *Ultrasonounds and their applications*, (in Polish), WNT, Warszawa, 2001.
- [16] Tadeusiewicz R., Augustyniak P., *Basics of biomedical engineering part 1*, (in Polish), AGH, Kraków, 2009.
- [17] Wyrzykowski R., *Basics of physics*, (in Polish), Rzeszów 1999.
- [18] User manual for the Philips Sonalleve MR – HIFU system, 2014.

Część V

**Metody numeryczne i narzędzia programowe
w akustyce**

Dawid ROMIK, Ireneusz CZAJKA, Katarzyna SUDER-DĘBSKA
**BADANIA NUMERYCZNE WPLYWU PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH
WENTYLATORA PROMIENIOWEGO NA GENEROWANY HAŁAS**

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska
e-mail: dromik@agh.edu.pl*

Streszczenie: Głównym celem podczas projektowania wentylatorów promieniowych jest osiągnięcie najwyższej wydajności przy zachowaniu najniższej emitowanej mocy akustycznej. Wpływ na generowany hałas przez maszyny przepływowe mają zarówno parametry konstrukcyjne, jak i eksploatacyjne. Zwiększenie szczeliny s_j jest korzystne dla obniżenia głośności [9]. Na języczku obudowy powstają różnice ciśnienia, które generują dźwięk przy częstotliwości obrotowej łopatek. Przy zwiększeniu odległości między wirnikiem a języczkiem stabilizują się rozkłady prędkości i zmniejszają wartości ciśnień, przez co spada poziom dźwięku. Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na emitowany hałas przez wentylator promieniowy przy pomocy symulacji komputerowych.

WSTĘP

Obliczeniowa mechanika płynów (CFD) wymaga do budowy takiego modelu jednej z metod: MRF (Multiple Reference Frames), mixing surface lub Sliding Mesh. Do analizy akustycznej z wykorzystaniem modelu Ffowcs Williams Hawkins (FW-H) wymagane obliczenia zmienne w czasie, do którego najlepiej nada się ostatnia z wymienionych metod. Najbardziej wydajne metody analizy przepływu wykorzystują metodę Reynoldsa (uśrednione przez RANS-Reynolds Navier-Stokes) do modelowania turbulencji w przepływie, ale nie dostarczają one informacji o chwilowych wartościach prędkości, ale tylko o średniej prędkości i średniej turbulencji w danym obszarze. W związku z tym wykorzystanie tych danych do obliczenia ciśnienia akustycznego jest trudne. O wiele dokładniejsze dane można uzyskać za pomocą podejścia Large Eddy Simulation (LES). Niestety, zastosowanie tej metody wymaga dużej gęstości siatki i bardzo małych kroków czasowych i konieczne jest wykonanie obliczeń dla kilku obrotów wirnika, aż do uzyskania stabilnego przepływu. Jedną z metod modelowania hałasu aerodynamicznego polega na określeniu źródeł akustycznych za pomocą, na przykład, analogii Lighthill'a, a następnie rozwiązaniu problemu propagacji zakłóceń akustycznych w analizowanym obszarze. W tym celu można zastosować liniowe równania Eulera, liniowe równania Naviera-Stokesa lub rozwiązanie równania falowego.

Do wyznaczenia wartości poziomu ciśnienia akustycznego został wykorzystany model akustyczny Ffowcs Williams Hawkins [1] dostępny w programie Ansys Fluent. Model FW-H przyjmuje ogólną postać analogii akustycznej Lighthill'a [2] i jest w stanie przewidzieć dźwięk generowany przez równoważne źródła akustyczne, takie jak monopole, dipole i kwa-

drupole. W programie Ansys Fluent przyjęte jest równanie, w którym ciśnienie akustyczne i sygnał akustyczny w wyznaczonych miejscach odbiornika obliczane jest poprzez wyznaczenie kilku całek po powierzchni. Równanie FW–H jest niejednorodnym równaniem falowym, które można wyznaczyć poprzez sprzężenie równań ciągłości oraz równań Naviera–Stokesa. Równanie FW–H można zapisać w postaci:

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ |P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)| \delta(f) \} + \frac{\partial}{\partial t} \{ |\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)| \delta(f) \} \quad (1)$$

gdzie

- u_i – prędkość płynu w kierunku osi x_i
- u_n – prędkość płynu w kierunku w kierunku normalnym do powierzchni $f = 0$
- v_i – prędkość powierzchni normalna do powierzchni
- $\delta(f)$ – delta Dirac'a
- $H(f)$ – funkcja Heaviside'a
- p' – ciśnienie akustyczne w polu dalekim ($p' - p_0$)
- n_i – wektor normalny do powierzchni źródła ($f > 0$)
- a_0 – prędkość dźwięku w polu dalekim
- T_{ij} – tensor naprężeń Lighthill'a
- P_{ij} – tensor naprężeń ściskających

Rozwiązanie równania (1) uzyskuje się przy użyciu funkcji Green'a ($\delta(g)/4\pi r$). Kompletne rozwiązanie polega na obliczeniu całek po powierzchni oraz całek objętościowych, z których te pierwsze reprezentują monopolowe, dipolowe i częściowo kwadropolowe źródła akustyczne, a drugie kwadropolowe źródła w regionie poza powierzchnią źródłową. Udział całki objętościowej staje się mały kiedy przepływ jest poddźwiękowy, a powierzchnia źródłowa otacza region źródłowy. W programie Ansys Fluent całki objętościowe są pomijane, stąd zależność:

$$p' = (\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) p'_L(\vec{x}, t) \quad (2)$$

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 (\dot{U}_n + U_{\dot{n}})}{r(1 - M_r)^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 U_n \{ r\dot{M}_r + a_0(M_r - M^2) \}}{r^2(1 - M_r)^3} \right] dS \quad (3)$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{a_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1 - M_r)^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2(1 - M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{a_0} \int_{f=0} \left[\frac{L_r \{ r\dot{M}_r + a_0(M_r - M^2) \}}{r^2(1 - M_r)^3} \right] dS \quad (4)$$

gdzie:

$$U_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0} (u_i - v_i) \quad (5)$$

$$L_i = P_{ij}\hat{n}_j + \rho u_i(u_n - v_n) \quad (6)$$

Biorąc pod uwagę czas obserwatora t oraz odległość do obserwatora r , całki powyższego równania obliczane są w czasie zdefiniowanym równaniem

$$U_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0}(u_i - v_i) \quad (7)$$

$$L_i = P_{ij}\hat{n}_j + \rho u_i(u_n - v_n) \quad (8)$$

\vec{n}, \vec{r} – wektory jednostkowe w kierunku promieniowania i kierunku ściany
 M – liczba Macha składowej prędkości źródła powierzchni wzdłuż kierunku wektora promieniowania

$$M_r = M_i r_i \quad \dot{M}_r = \frac{\partial M_i}{\partial \tau} r_i$$

$$Q_n = Q_i \hat{n}_i \quad \dot{Q}_n = \frac{\partial Q_i}{\partial \tau} \hat{n}_i \quad Q_{\dot{n}} = Q_i \frac{\partial \hat{n}_i}{\partial \tau}$$

$$L_i = L_i j \hat{n}_i \quad \dot{L}_r = \frac{\partial L_i}{\partial r} \dot{r}_i \quad L_r = L_i \hat{r}_i \quad L_M = L_i M_i$$

OBIEKT BADAŃ

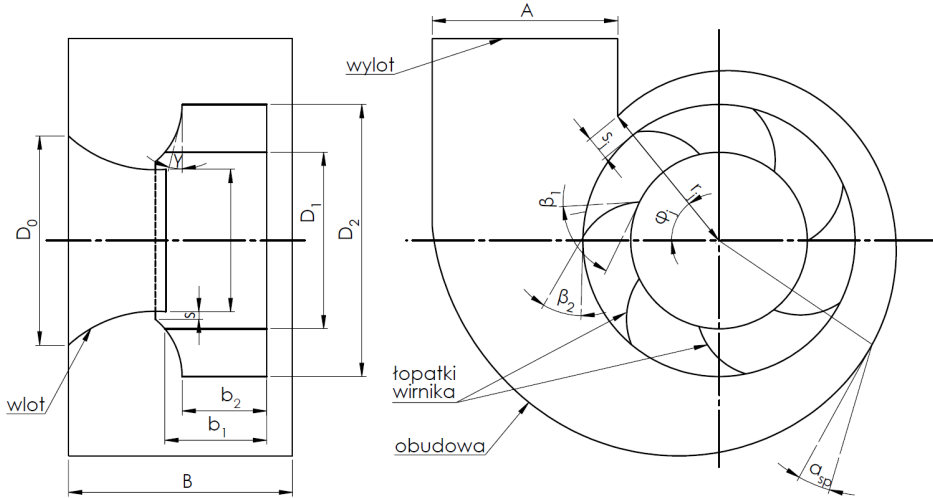
Obiektem badań jest płaski model wentylatora promieniowego. Zaletą wybranego podejścia do modelowania jest jego niska złożoność obliczeniowa, co skutkuje znacznie krótszym czasem niż w przypadku modelu trójwymiarowego. Parametrami eksploatacyjnymi, które opisują wentylatory promieniowe to [8, 9]:

- wydajność objętościowa \dot{V}
- ciśnienie całkowite Δp
- moc użyteczna N_u
- moc mechaniczna N_m
- sprawność η

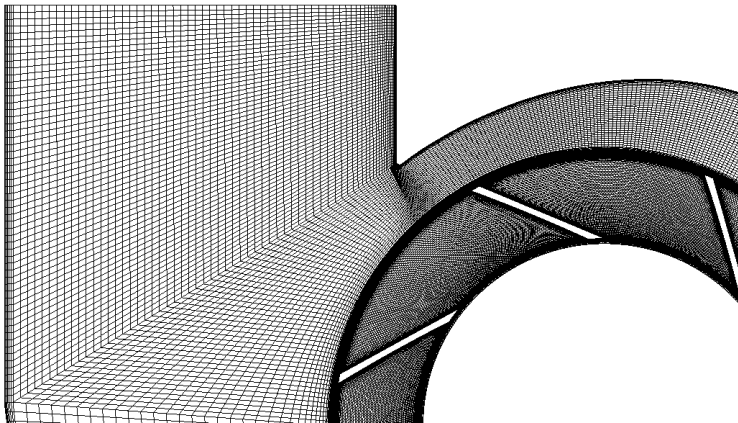
natomiast parametrami konstrukcyjnymi są:

- średnica wewnętrzna i zewnętrzna wirnika D_1, D_2
- średnica otworu wlotowego D_0
- szerokość wirnika u wlotu i wylotu b_1, b_2
- kąt łopatki u wlotu i wylotu β_1, β_2
- kąt nachylenia tarczy przedniej γ
- promień języczka r_j
- kąt języczka φ_j
- promień wodzący spirali r_φ
- szerokość obudowy B
- wysokość okna wlotowego A
- ilość łopatek wirnika z
- kąt rozwinięcia spirali logarytmicznej α_{sp}

- szczelina przywlotowa s
- zagłębienie leja wlotowego x
- grubość łopatki g



Rysunek 1. Parametry konstrukcyjne wentylatora promieniowego



Rysunek 2. Siatka obliczeniowa

Do wygenerowania siatki obliczeniowej zastosowano program ICEM CFD z pakietu ANSYS. Siatkę podzielono na strefy charakterystyczne dla modelu ze strefą obrotową zawierającą wirnik, oraz dwie strefy stacjonarne, w skład której wchodzi strefa wlotu oraz wypełnienie obudowy: strefa obrotowa 80908 elementy, strefa obudowy 24735 elementy, strefa wlotu

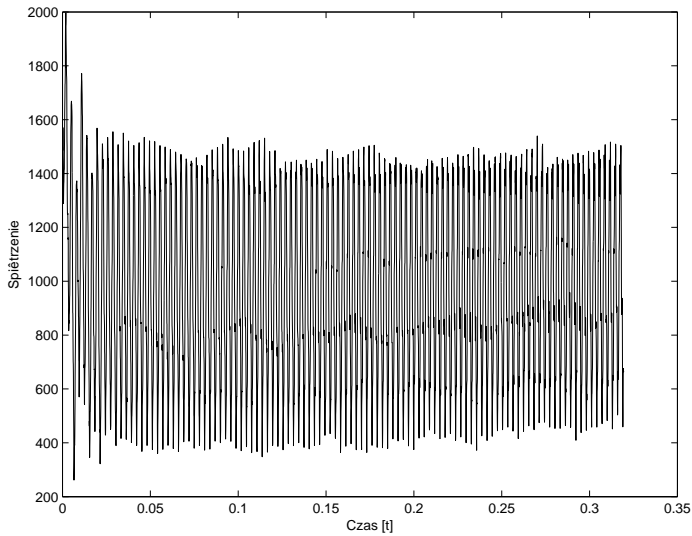
1980 elementy skończone. Cały model składa się z 107623 elementów siatki a to niewielki ułamek liczby elementów wymaganych do zbudowania pełnego modelu 3D, który zwykle składa się od 2 do nawet 20 milionów elementów. Fragment siatki pokazano na rysunku 2. Wykonana została analiza zbieżności siatki która wykazała, że zbudowany model jest wystarczający do uzyskania oczekiwanych wyników. W przypadku siatki składającej się z dwukrotnie większej liczby elementów parametry takie jak spiętrzenie całkowite czy też prędkość powietrza w charakterystycznych punktach geometrii zmieniają się zaledwie o kilka setnych procenta a czas potrzebny na wykonanie obliczeń zwiększa się prawie dwukrotnie.

OBLICZENIA NUMERYCZNE

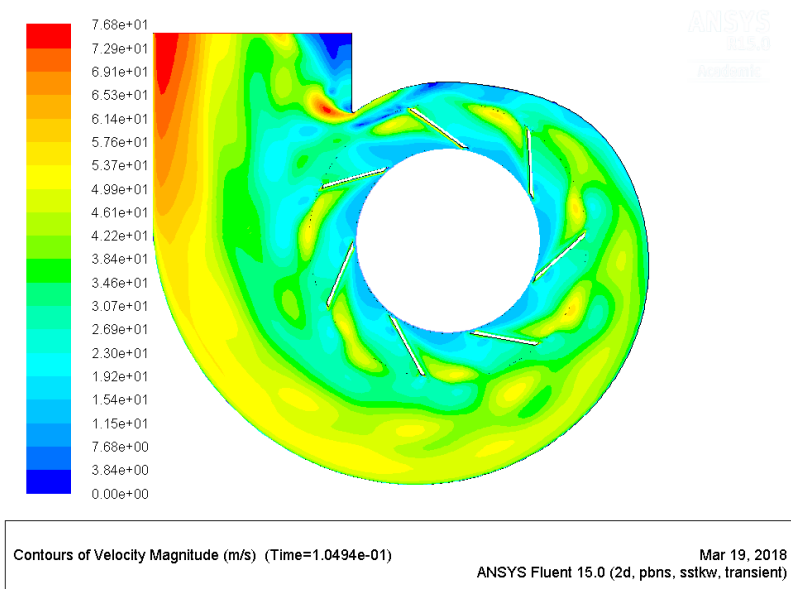
Obliczenia numeryczne wykonano w programie Ansys Fluent. Na łopatkach wirnika oraz ściankach obudowy nadano warunek brzegowy *Wall* co uniemożliwia przepływ powietrza przez te powierzchnie. Na wlocie zadano prędkość powietrza $14 \frac{m}{s}$ natomiast na wylocie przyjęto warunek *Outflow*. Strefę obrotową wirnika wprowadzono w ruch obrotowy o prędkości 2880 obr/min. W symulacji zastosowano podejście *Sliding Mesh*. Przyjęty krok czasowy $\Delta t = 5,83 \cdot 10^{-5}$ odpowiada 1° obrotu wirnika. Do obliczeń wykorzystano model opisany równaniami ciągłości i Naviera–Stokes’a z uśrednianiem Reynoldsa (RANS). Do domknięcia modelu wykorzystano dwu–równaniowy model turbulencji Mentera $k - \omega SST$ [3, 4].

Model $k - \omega SST$ jest modelem, który łączy zalety modelu $k - \epsilon$ i modelu $k - \omega$ oraz wprowadza dodatkowy człon ograniczający nadprodukcję energii kinetycznej turbulencji w obszarach silnych dodatnich gradientów ciśnienia (punkty spiętrzenia, obszary oderwania warstwy przyściennej. Menter badając modele $k - \epsilon$ i $k - \omega$, zaobserwował, że pierwszy z nich dobrze modeluje turbulencje w przepływie swobodnym i warstwach ścinanych oraz charakteryzuje się małą czułością na warunki wlotowe, dla wielkości opisujących turbulencje. Jest to pożądana cecha ze względu na fakt, że często w praktycznych obliczeniach wielkości te nie są dokładnie znane. Model $k - \omega$ za to znacznie lepiej modeluje przepływ turbulentny w warstwie przyściennej, natomiast jest bardzo czuły na wartości wielkości turbulentnych w przepływie swobodnym.

W celu przyspieszenia obliczeń w pierwszej kolejności wykonano symulację w stanie ustalonym i po osiągnięciu zbieżności wyników uruchomiono obliczenia zmienne w czasie.0. Jako warunek ustalenia przepływu w modelu numerycznym przyjęto ustabilizowanie się wartości spiętrzenia całkowitego. Na rysunku 3 można zauważyć, że omawiany parametr stabilizuje się dość szybko i w przedziale od 0,05s do końca analizowanego czasu nie widać znaczących różnic w jego zmianie. Jego średnia wartość wynosi 974.28Pa. Według katalogu [5], z którego zaczerpnięto wymiary gabarytowe modelu wartość ta powinna wynosić 1190Pa, z czego wynika, że różnica nie przekracza 20%. Badany obiekt był również przedmiotem pracy [10], w której przeprowadzono podobne symulacje a uzyskane wartości spiętrzenia nie odbiegały od wyników uzyskanych w niniejszej pracy. Dlatego też uzyskane wartości spiętrzenia uznano za prawidłowe i zdecydowano się na analizę akustyczną sygnału zarejestrowanego w całym przedziale czasowym przeprowadzonej symulacji. W celu zweryfikowania poprawności wykonania modelu, analizie poddano również rozkład prędkości w obudowie spiralnej. Zarówno wartości prędkości jak i jej rozkład w obudowie spiralnej (rys.4) były zgodne z oczekiwanymi.



Rysunek 3. Spiętrzenie całkowite



Rysunek 4. Rozkład prędkości powietrza

Do obliczenia poziomu ciśnienia akustycznego przyjęto model FW-H. Jako źródła akustyczne przyjęto łopatki wirnika i obudowę spiralną wentylatora. Poziom ciśnienia akustycz-

nego wyznaczono w odległościach od osi wirnika kolejno dla 1,2 i 3 m na osi x,y i z. Aby zbadać wpływ parametrów konstrukcyjnych wentylatora na generowany hałas zdecydowano się zbadać dwa z nich w różnych konfiguracjach. Badane parametry to szczelina s_j oraz kąt opasania wirnika przy, którym wartość parametru s_j jest stała α_s . Przyjęto następujące konfiguracje:

Konfiguracja 1: $s = 35\text{mm}$ $\alpha_s = 5^\circ$

Konfiguracja 2: $s = 35\text{mm}$ $\alpha_s = 35^\circ$

Konfiguracja 3: $s = 14\text{mm}$ $\alpha_s = 5^\circ$

Konfiguracja 4: $s = 14\text{mm}$ $\alpha_s = 35^\circ$

Uzyskane wyniki, dla poszczególnych konfiguracji oznaczone odpowiednio od a do d , przedstawiono na rysunkach 5–13.

Z uzyskanych wyników można zauważyć, że w każdej możliwej konfiguracji występuje stała częstotliwość łopatkowa równa 339,9Hz. Analizując każdą konfigurację z osobna widać, że wraz z oddaleniem się od źródła o każdy kolejny metr zarejestrowane są spadki poziomu ciśnienia akustycznego o 4–8dB. Zestawiając ze sobą konfigurację 1 i 3 oraz 2 i 4, tj. zmniejszenie odległości języczka od wirnika, widać wyraźny wzrost SPL na poziomie 4–8dB. Dość interesującym wydaje się być przypadek, w którym przy stałej odległości wirnika od obudowy zmienia się kąt opasania wirnika α_s . Okazuje się że przy stałym kącie opasania wartość poziomu ciśnienia akustycznego zmniejsza się o 1–2dB. W tabeli 3 przedstawiono wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla częstotliwości łopatkowej oraz kolejnych harmonicznnych.

Tablica 1. Wartości SPL [dB] w odległości 1m od źródła w osi X

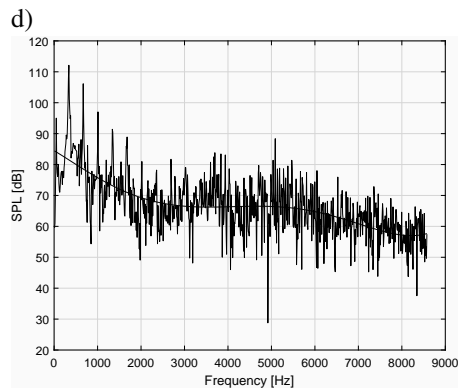
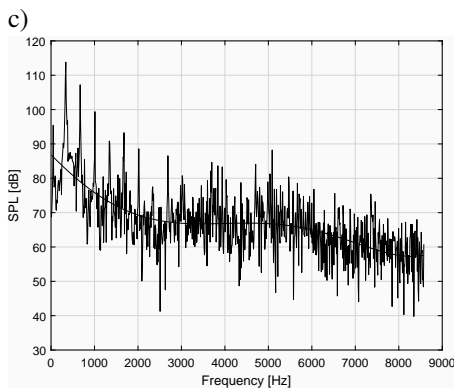
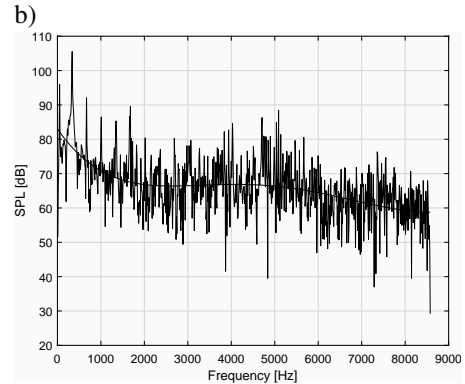
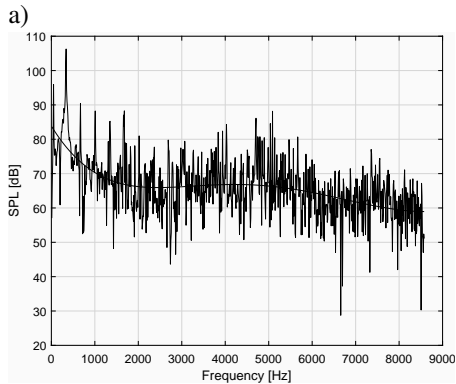
Konfiguracja	Częstotliwość łopatkowa i jej harmoniczne					
	339,9	669,7	1010	1349	1679	2019
1	106,3	90,45	88,24	85,25	88,26	80,98
2	105,5	92,07	86,5	85,33	89,61	80,4
3	113,8	107,2	99,39	90,81	93,27	88,59
4	112,1	106,1	97,02	91,41	88,91	80,98

Tablica 2. Wartości SPL [dB] w odległości 2m od źródła w osi X

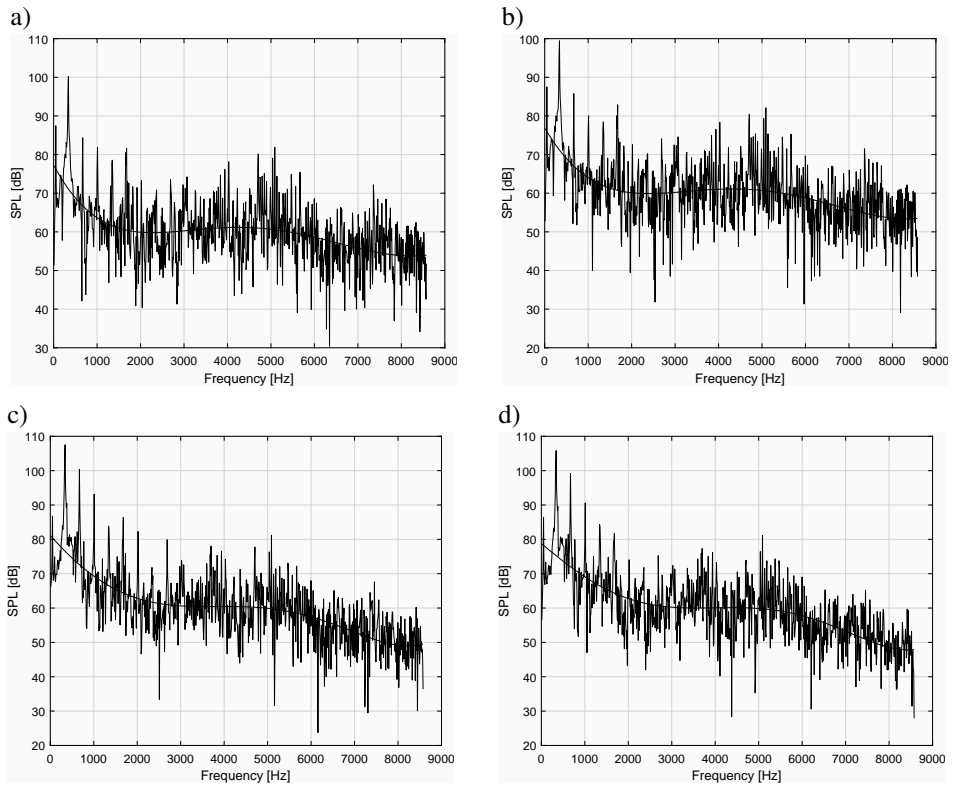
Konfiguracja	Częstotliwość łopatkowa i jej harmoniczne					
	339,9	669,7	1010	1349	1679	2019
1	100,2	84,34	81,86	78,54	81,64	73,25
2	99,44	85,78	80,02	78,44	82,88	72,55
3	107,5	100,3	93,09	83,4	86,37	82,28
4	105,9	99,18	90,6	83,51	81,7	74,4

Tablica 3. Wartości SPL [dB] w odległości 3m od źródła w osi X

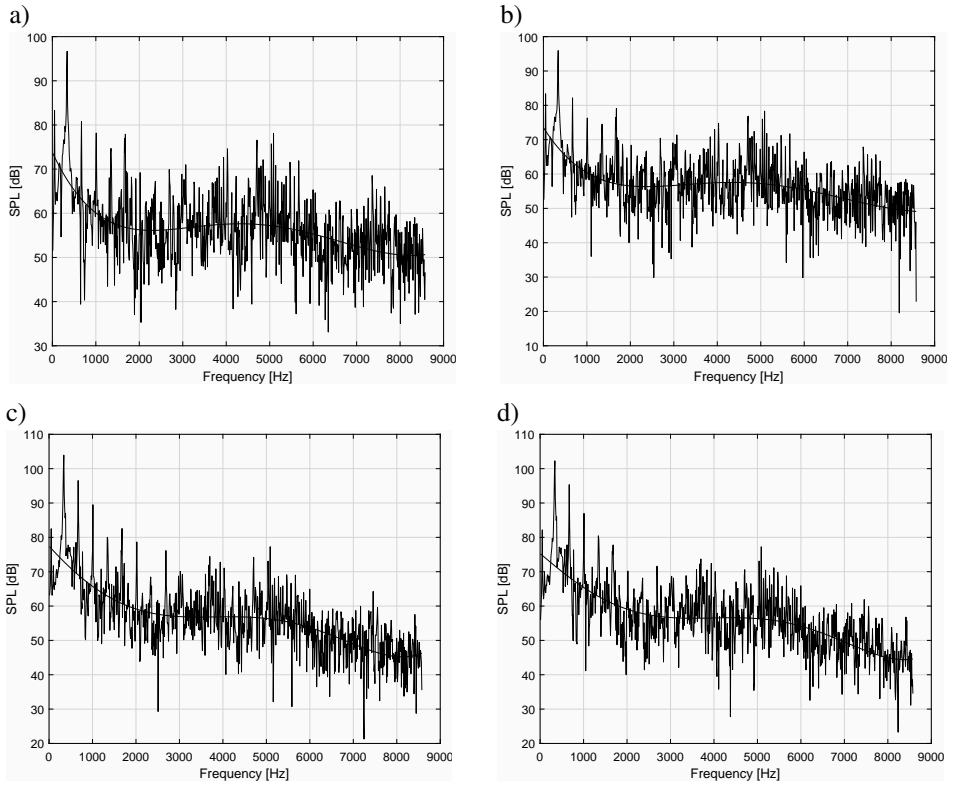
Konfiguracja	Częstotliwość łopatkowa i jej harmoniczne					
	339,9	669,7	1010	1349	1679	2019
1	96,97	80,79	78,18	74,68	76,9	69,21
2	95,94	82,17	76,31	74,53	76,44	68,4
3	103,9	96,53	89,5	79,61	82,58	78,66
4	102,3	95,34	86,97	79,68	77,79	70,2



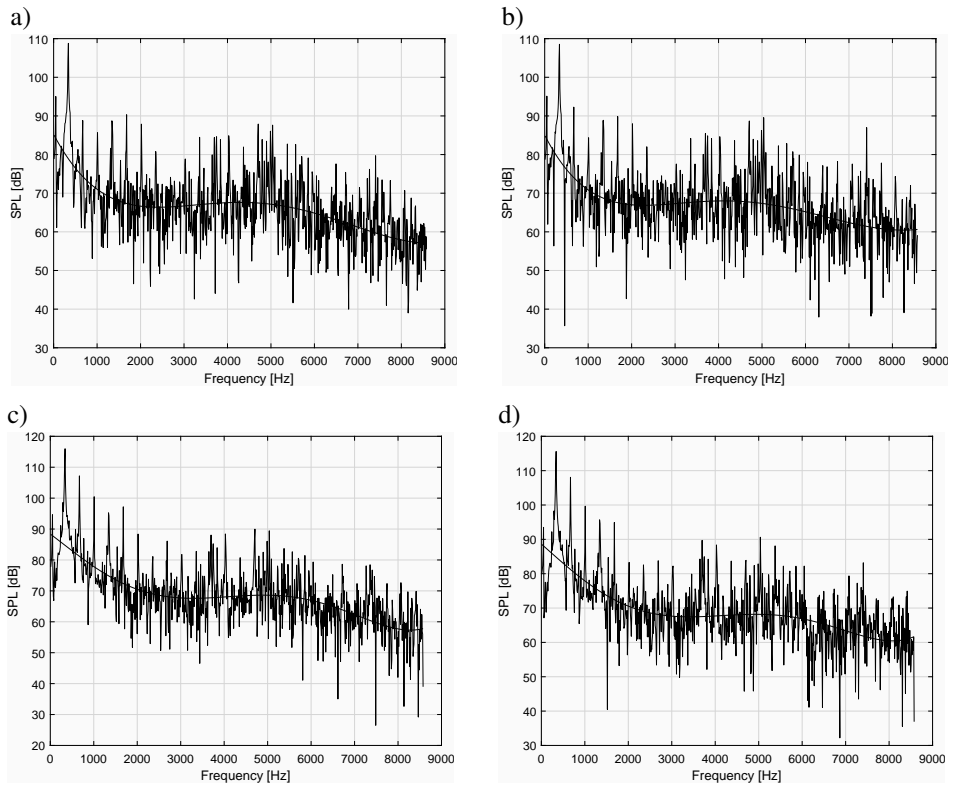
Rysunek 5. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 1m od źródła w osi X



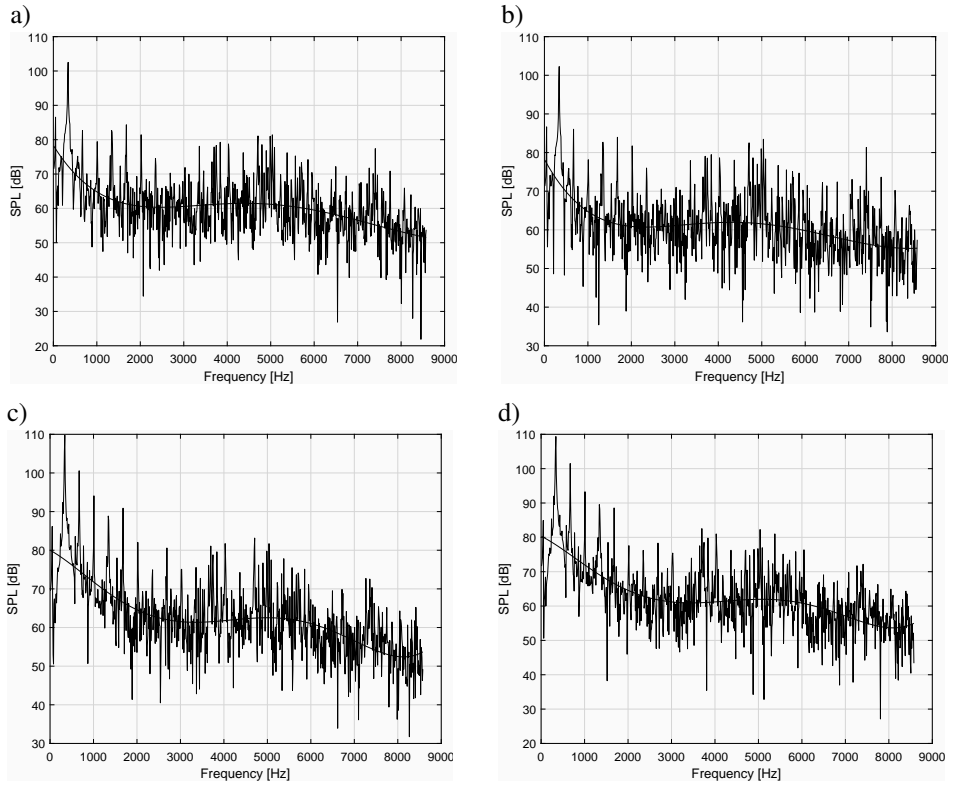
Rysunek 6. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 2m od źródła w osi X



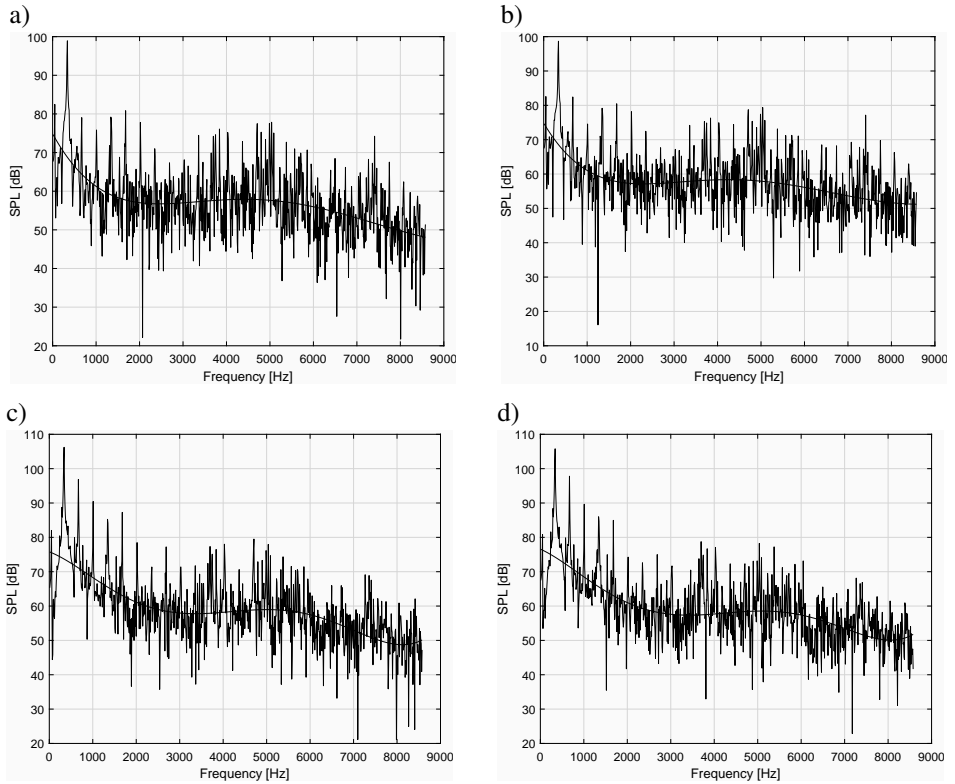
Rysunek 7. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 3m od źródła w osi X



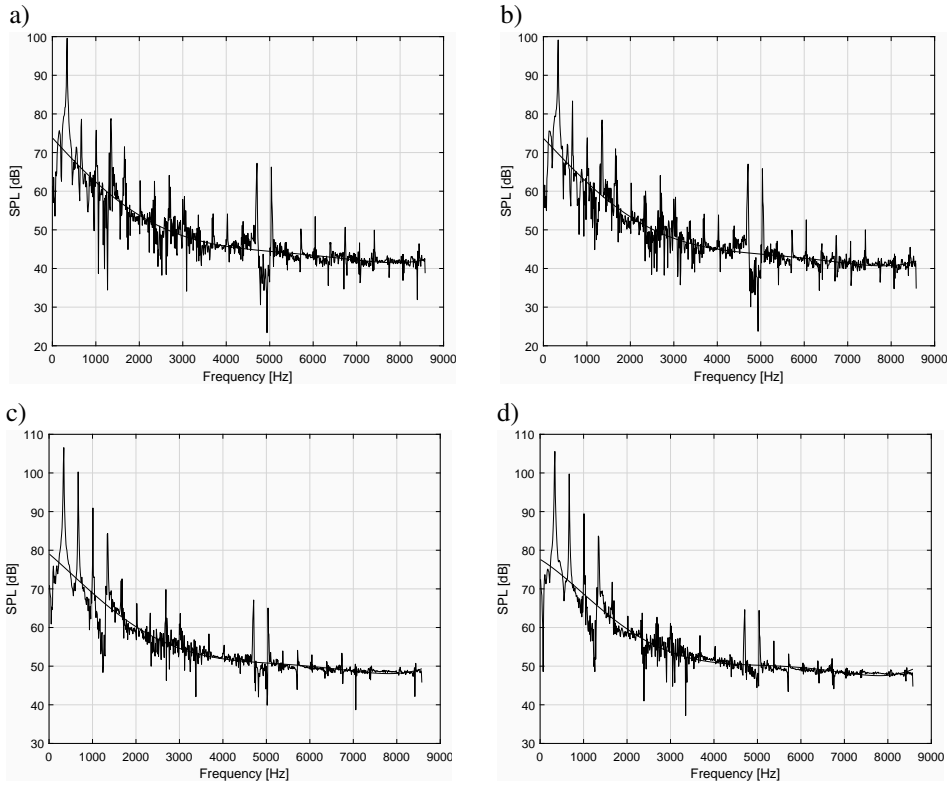
Rysunek 8. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 1m od źródła w osi Y



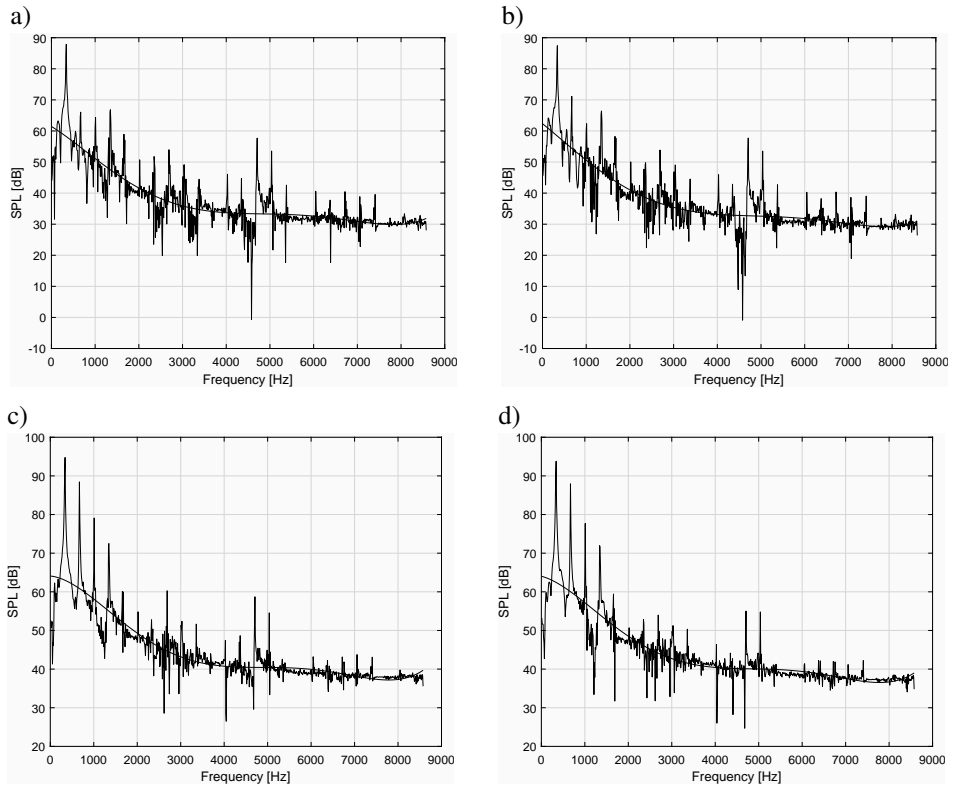
Rysunek 9. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 2m od źródła w osi Y



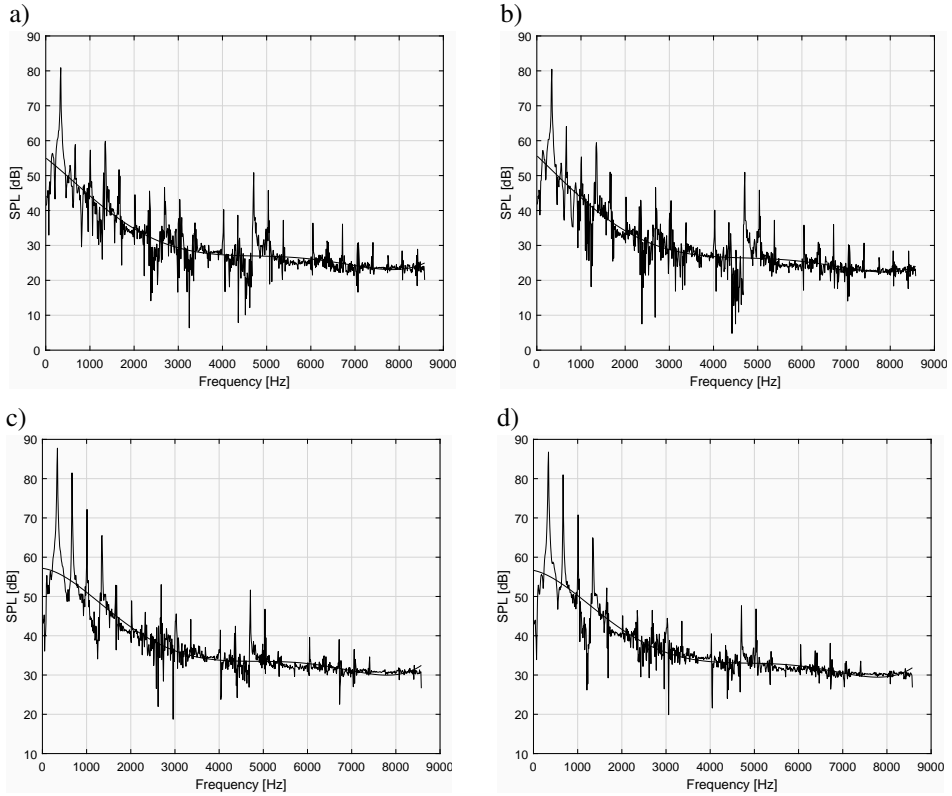
Rysunek 10. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 3m od źródła w osi Y



Rysunek 11. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 1m od źródła w osi Z



Rysunek 12. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 2m od źródła w osi Z



Rysunek 13. Poziom ciśnienia akustycznego wyznaczonego w odległości 3m od źródła w osi Z

PODSUMOWANIE

Zastosowanie modelu FW–H w obliczeniowej mechanice płynów ułatwia przewidywanie hałasu w polu dalekim. Analogie akustyczne pozwalają obliczyć ciśnienie akustyczne poza domeną numeryczną, co powoduje znaczne skrócenie czasu obliczeń. Dobrze zaprojektowane komputerowe modele maszyn przepływowych umożliwiają weryfikację istniejących maszyn oraz prototypów na wczesnym etapie projektowania. Korzystając z modeli 2D, można spodziewać się satysfakcjonujących wyników w krótkim czasie. Niemniej jednak w modelu płaskim niemożliwe jest uchwycenie wszystkich zjawisk związanych z turbulentnym przepływem powietrza, które również wpływają na generowany hałas. Jednak omówione przykłady modeli komputerowych w dużym stopniu odzwierciedlają zachowanie rzeczywistych obiektów, a zatem obliczanie parametrów przepływu za pomocą symulacji komputerowych jest dobrym zastosowaniem do sprawdzania poprawności obiektu.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej nr 11.11.130.170.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. E. Ffowcs-Williams, D. L. Hawkings: *Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion*. Proc. Roy. Soc. London, A264:321–342, 1969.
- [2] M. J. Lighthill: *On Sound Generated Aerodynamically*. Proc. Roy. Soc. London, A211:564–587, 1952.
- [3] F. R. Menter: *Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows*, AIAA Paper, 93-2906, 1993.
- [4] Ansys Fluent. Theory Guide. Ansys Inc. 2015
- [5] OWENT–Wentylatory przemysłowe WWOax, <http://www.owent.pl/>, Accessed 2013.05.16
- [6] Z. Engel: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.
- [7] S. Fortuna, I. Czajka: *Experimental verification of selected equations describing the sound power level in fans*. Zeszyty Naukowe / Politechnika Łódzka ; nr 1076. Ciepłotechniczne Maszyny Przepływowe. Seria: Turbomachinery, 2010 no. 138 s. 21–32
- [8] S. Fortuna, K. Sobczak: *Numerical and experimental investigations of the flow in the radial fan*. Mechanics 2008, vol.27, no.4
- [9] S. Fortuna: *Wentylatory. Podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno – eksploatacyjne i zastosowanie*. Kraków, TECHWENT, 1999.
- [10] S. Fortuna: *Badania pracy użytecznej i strat w wentylatorze promieniowym*. Rozprawy monograficzne 227. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2011.
- [11] D. Romik, I. Czajka, A. Gołaś: *Badania numeryczne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na hałas aerodynamiczny wentylatora promieniowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk 2016. t. 18 nr 2, s. 43–52.

Część VI

Wibroakustyka w technice i środowisku

Janusz KOMPALA

DROGOWE EKRANY AKUSTYCZNE – WYBAWIENIE CZY PRZEKLEŃSTWO

*Główny Instytut Górnictwa,
Katowice*

Streszczenie: Hałas niskoczęstotliwościowy jest uznawany jako jeden z istotnych problemów ochrony środowiska bytowego człowieka przed nadmiernym hałasem. Tradycyjne metody oceny uciążliwości hałasu w środowisku są bardzo często niewystarczające w przypadku oddziaływania źródeł sygnałów infradźwiękowych. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że hałas niskoczęstotliwościowy emitowany na poziomie 40 – 100 dB (w zależności od konkretnej częstotliwości) wprawdzie nie wywołuje negatywnych skutków zdrowotnych, jednak może być źródłem dużych uciążliwości. Przykładem mogą być wyniki badań przeprowadzonych w pomieszczeniach mieszkalnych w bezpośrednim sąsiedztwie ekranu akustycznego. Wyniki przeprowadzonych badań i ocen potwierdzają, iż źródłem tego typu uciążliwości w środowisku zewnętrznym są przede wszystkim źródła hałasów przemysłowych, transport drogowy i kolejowy oraz, co nie wszystkim wydaje się oczywiste, obiekty inżynierskie typu ekrany akustyczne stanowiące, bardzo często, wtórne źródło niskoczęstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych. Sygnały te powodują, w związku z konstrukcją pomieszczeń powstawanie rezonansów w zakresie niskich częstotliwości. Publikowane badania skutków wywołanych ekspozycją na hałas środowiskowy z zawartością infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego bardzo często oparte są o pomiary z zastosowaniem charakterystyki częstotliwościowej A, czyli praktycznie całkowicie pozbawione informacji o zawartości hałasu niskoczęstotliwościowego.

WSTĘP

W ostatnim czasie obserwuje się, iż zagrożenie hałasem charakteryzuje się dużą powszechnością występowania szczególnie na terenach zurbanizowanych. Rozwój wielkich regionów miejskich pociąga za sobą wiele problemów w tym także związanych z wzrostem liczby antropogenicznych źródeł hałasu infradźwiękowego.

Przyjmuje się, iż infradźwięki to wszystkie dźwięki poniżej progu słyszalności tj. 20 Hz. Z uwagi na to, że przy dostatecznie wysokich poziomach ciśnienia akustycznego infradźwięki odbierane są przez ucho, w niektórych opracowaniach górna granica infradźwięków wynosi 16 Hz. Rozbieżności te obejmują nawet różne dokumenty normalizacyjne:

- PN-N-01338:2010 [1] mianem infradźwięków określa dźwięki lub hałas, którego widmo częstotliwościowe zawarte jest w zakresie od 2 Hz do 16 Hz,
- PN-ISO 7196:2002 [2] do infradźwięków zalicza dźwięki lub hałas, którego widmo częstotliwościowe zawarte jest w zakresie od 1 Hz do 20 Hz.

Hałas infradźwiękowy obejmuje dźwięki powodujące hałas z zakresu częstotliwości od 2 do 20 Hz. Natomiast hałas niskoczęstotliwościowy obejmuje dźwięki powodujące hałas w zakresie częstotliwości od 10 do 250 Hz.

Hałas niskoczęstotliwościowy może być zarówno pochodzenia mechanicznego, aerodynamicznego, jak i hydrodynamicznego. W ostatnich latach obserwuje się także znaczący wzrost ekspozycji i co za tym idzie zwiększa się liczba osób ekspozowanych na ten rodzaj hałasu.

OCENA INFRADŹWIĘKÓW ORAZ HAŁASU NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO

Pojawianie się w środowisku sygnałów infradźwiękowych, które mogą wystąpić w środowisku nawet w znacznych odległościach od źródeł, o dużym natężeniu nie pozostaje obojętne dla stanu organizmów żywych.

Infradźwięki nie są rejestrowane przez mierniki dźwięku z filtracją A, która mocno redukuje zarówno niskie jak i wysokie częstotliwości. Z tego powodu bywają traktowane jako nieszkodliwe, chociaż, zwłaszcza przy dużych poziomach, powodują dyskomfort, głównie nudności. Związane to jest z wprawianiem w okresowe drgania organów wewnętrznych, w tym żołądka [3].

Hałas infradźwiękowy, mimo, że na ogół jest niesłyszalny, może mieć negatywny wpływ na zdrowie i samopoczucie człowieka. Infradźwięki, chociaż w specyficzny sposób, to jednak są odbierane w organizmie (głównie przez narząd słuchu). Ich słyszalność zależy od poziomu ciśnienia akustycznego, częstotliwości i jest uwarunkowana dużą zmiennością osobniczą w zakresie percepcji słuchowej infradźwięków, szczególnie dla najniższych częstotliwości. Progi ich słyszenia są tym wyższe, im niższa jest częstotliwość i sięgają przykładowo około 100 dB dla częstotliwości 6 – 8 Hz oraz około 90 dB dla częstotliwości 12– 16 Hz. Infradźwięki są odbierane nie tylko specyficzną drogą słuchową, ale także przez receptory czucia wibracji, której progi leżą o 20 – 30 dB wyżej niż progi słyszenia.

Dla określenia stopnia uciążliwości hałasu LF (niskoczęstotliwościowego) istotne jest określenie kryterium jego uciążliwości, wiążanego zwykle z progiem jego odczuwania lub słyszalności, w zależności od częstotliwości.

G. Leventhall [4], analizował różne takie kryteria, w tym kryterium Watanabe, Møllera z 1990 r. poniżej 20Hz i zbieżne z nim powyżej 20Hz kryterium z ISO 226:2003. Określił on medianę krzywej słyszalności dla LF: 107 dB (dla 4 Hz), 97 dB (dla 10 Hz), 79 dB (dla 20 Hz) i 51 dB (dla 40 Hz). Oznacza ona poziom progu słyszalności dla 50% młodych ludzi (18-25 lat). 68% mieści się w ramach odchylenia standardowego +/- 6 dB. Ok. 16% jest ponad 6 dB (a ok. 2% jest ponad 12 dB) bardziej wrażliwa niż wskazuje to taka mediana progu słyszalności.

Jednak nawet hałas niskoczęstotliwościowy poniżej niebezpiecznych poziomów ciśnienia akustycznego może być uciążliwy. Szczególnie uciążliwy charakter przybiera on w budynkach mieszkalnych, gdzie hałas taki o nawet bardzo małych poziomach ciśnienia akustycznego, w pobliżu progów detekcji, ale generowany w ich obrębie jest subiektywnie gorzej tolerowany od hałasu komunikacyjnego. Świadczą o tym zarówno wyniki subiektywnych badań ankietowych, jak i bardziej obiektywnych testów psychologicznych i badań stanu zdrowia mieszkańców podawane w literaturze [5]. Zdaniem autorki tej pracy, występujący długotrwale w pomieszczeniach mieszkalnych hałas niskoczęstotliwościowy, nawet o poziomach zbliżonych do progów percepcji, które nie przekraczają poziomu dźwięku A, jest odbierany jako uciążliwy lub bardzo uciążliwy i stwarza potencjalne ryzyko zdrowotne dla mieszkańców. Osoby takie uskarżają się częściej na ogólnie zły stan zdrowia, przewlekłą bezsenność a także

dolegliwości ze strony serca. Występują u nich obiektywnie mierzone cechy zwiększające ryzyko zawału. U części, wielokrotnie częściej niż w grupie kontrolnej, występowała średnio ciężka i ciężka depresja [6].

W środowisku domowym czas ekspozycji jest wydłużony często do 24 godzin na dobę. Dodatkowo niekorzystne efekty ekspozycji są także modyfikowane przez cechy osobnicze, porę doby i rodzaj prowadzonej aktywności. W warunkach pozazawodowych oprócz osób cieszących się dobrym zdrowiem, na hałas eksponowane są także dzieci w różnym wieku, osoby starsze czy chore.

Wprowadzone w Polsce uregulowania prawne dotyczące hałasu w budynkach [7,8] mają zastosowanie również dla hałasu niskoczęstotliwościowego w obszarach widma powyżej górnej częstotliwości granicznej dla hałasu infradźwiękowego (powyżej 20 Hz). Powinny one zastąpić normę [9], co jednak wymaga uprzedniej nowelizacji także i normy [10] określającej dopuszczalne poziomy hałasu. Dopóki tak się nie stanie, norma PN-87/B-02156 pozostanie normą nadal obowiązującą.

Aktualnie brak jest normy określającej poziomy dopuszczalne hałasu w zakresie niskich częstotliwości. Przejściowe zalecenia z zakresu kontroli i oceny hałasu niskoczęstotliwościowego w pomieszczeniach mieszkalnych zawiera Instrukcja 358/98 Instytut Techniki Budowlanej pt: "Ocena hałasu niskoczęstotliwościowego w pomieszczeniach mieszkalnych". Zgodnie z tą instrukcją oceny zagrożenia hałasem niskoczęstotliwościowym dokonuje się na podstawie wyników pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych z zakresu 10-250 Hz. W tabeli 1 zestawiono poziomy ciśnienia akustycznego odpowiadające granicy poziomów zalecanych.

Tablica 1. Poziomy ciśnienia akustycznego odpowiadające granicy poziomów zalecanych

Częstotliwość środkowe pasm 1/3 oktawowych [Hz]	Wartości poziomu ciśnienia akustycznego [dB]
10,0	80,4
12,5	73,4
16,0	66,7
20,0	60,5
25,0	54,7
31,5	49,3
40,0	44,6
50,0	40,2
63,0	36,2
80,0	32,5
100,0	29,1
125,0	26,1
160,0	23,4
200,0	20,9
250,0	18,6

Określenie przez analogię jak dla poziomów dźwięku A poziomów dopuszczalnych przy elewacji budynku dla hałasów niskoczęstotliwościowych napotyka na szereg trudności wynikających między innymi z stosowanego wskaźnika oceny, niewielkiego tłumienia hałasu niskoczęstotliwościowego przez przegrody który łatwo przenika do pomieszczeń czy możliwości rezonansowego wzmocnienia hałasu w pomieszczeniach.

Na podstawie pomiaru i analizy hałasu przy elewacji należy wstępnie oszacować jego skład widmowy oraz porównać wartości poziomów ciśnienia akustycznego z podanymi w tabeli. Następnie, określić potencjalną możliwość wystąpienia uciążliwości w pomieszczeniach mieszkalnych i podjąć decyzję o przeprowadzeniu właściwych badań w budynku zgodnie z powyższą instrukcją.

BADANIA POLIGONOWE

Przeprowadzone badania wstępne i sondażowe pozwoliły na identyfikację źródeł niskoczęstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych oraz dokonanie oceny odpowiadającego im poziomu hałasu zarówno w środowisku zewnętrznym jak i domowym.

Poddany badaniom obszar charakteryzują: zwarta, wysoka zabudowa oraz małe odległości między drogą a budynkami. Do ochrony przed nadmiernym hałasem zainstalowano na poboczu drogi ekrany akustyczne.

W każdej sesji pomiarowej prowadzono równoczesne pomiary drgań (prędkość, przyspieszenie) oraz pomiary poziomu ciśnienia akustycznego.

Punkty pomiarowe skaningowego wibrometru laserowego znajdowały się na: pierwszym polu ekranu lekkiego – na środku płyty z pleksiglasu, na słupie ciężkim (lewa strona) i słupie lekkim (prawa strona), na fundamencie słupów (na fundamencie słupa montowano również przetwornik przyspieszeń), na szybie okiennej II p.

Przeprowadzono kilkadziesiąt pomiarów dla ekranów oraz kilka pomiarów dla szyby okiennej oraz kilkanaście dodatkowych pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w wybranych punktach zaznaczonych.

Wyniki pomiarów dla każdego punktu pomiarowego zawierały:

- przebiegi czasowe – zmiany wartości chwilowych prędkości drgań w czasie,
- analizy FFT dla prędkości i przyspieszenia drgań,
- pomiary poziomu ciśnienia akustycznego w czasie intensywnego i słabego ruchu drogowego, zarejestrowane sygnały poddano analizie 1/3 oktaawowej.

Poniżej przedstawiono przykłady opracowanych wyników pomiarów przeprowadzonych na analizowanym obszarze.

WYNIKI BADANIA DRGAŃ

Tablica 2. Wartości maksymalne prędkości drgań w określonych pasmach częstotliwości

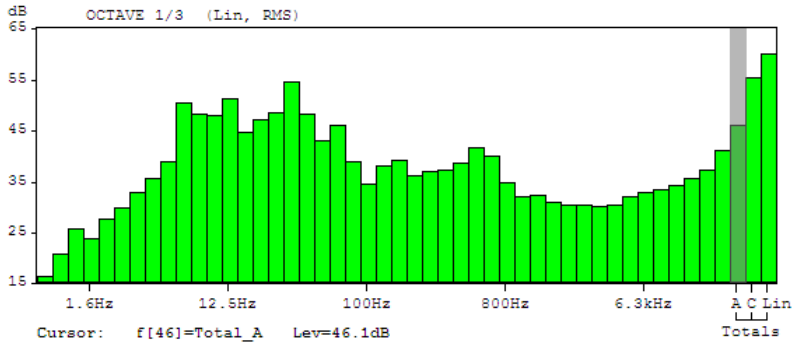
Pasma	Hz	0 - 20	20 - 31,5	31,5 - 63	63 - 128	128 - 250
		A	B	C	D	E
Panel ekranu	$\mu\text{m/s}$	31	10,5	1,6	3	1
Szyba – II piętro	$\mu\text{m/s}$	7	63	4,5	26,3	7

WYNIKI BADANIA HAŁASU

Tablica 3. Wartości maksymalne poziomu ciśnienia akustycznego dla częstotliwości środkowych pasm 1/3-oktawowych dla poszczególnych przedziałów częstotliwości

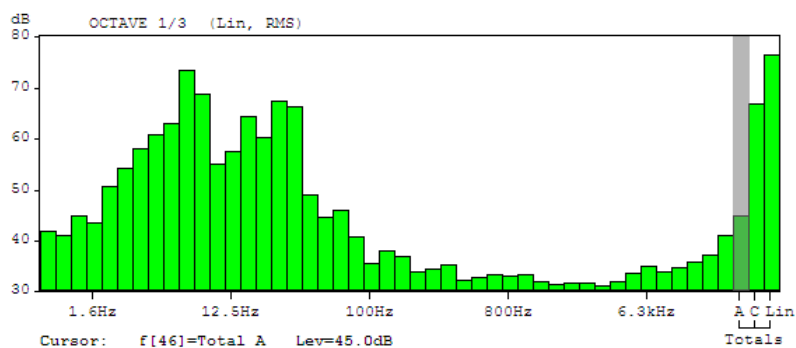
Zakres częstotliwości [Hz]	Miejsce pomiaru		
	W odległości 15 m od ekranu	W odległości 40 od ekranu przy elewacji budynku mieszkalnego, II piętro	W pomieszczeniu mieszkalnym – w czasie przejazdu ciężkiego pojazdu
do 20 Hz	57,7 dB	60,2 dB	73,5 dB
20-32 Hz	62,0 dB	65,9 dB	67,6 dB
32-64 Hz	64,4 dB	65,3 dB	49,0 dB
64-128 Hz	62,5 dB	59,3 dB	46,0 dB
128-256 Hz	53,9 dB	51,9 dB	38,0 dB

Na rys. 1 przedstawiono widma 1/3 tercjowe hałasu występującego w pomieszczeniu mieszkalnym budynku zlokalizowanym na II piętrze 25-kondygnacyjnego budynku mieszkalnego, dla dwóch przypadków: w czasie typowego ruchu pojazdów po drodze oraz w czasie wzbudzenia odczuwalnych drgań niskoczęstotliwościowych (drzenie szyb) związanych z ruchem ciężkiego pojazdu.



Rysunek 1. Wartości poziomu ciśnienia akustycznego funkcji częstotliwości w punkcie zlokalizowanym w pomieszczeniu mieszkalnym na II piętrze budynku, w czasie typowego ruchu pojazdów

f[Hz]	L [dB]	f[Hz]	L [dB]	f[Hz]	L [dB]
0.8	16.5	31.5	54.6	1250.0	32.4
1.0	20.9	40.0	48.4	1600.0	31.2
1.3	25.8	50.0	43.1	2000.0	30.4
1.6	23.8	63.0	46.1	2500.0	30.5
2.0	27.7	80.0	39.0	3150.0	30.2
2.5	30.0	100.0	34.7	4000.0	30.6
3.1	33.0	125.0	38.1	5000.0	32.1
4.0	35.8	160.0	39.3	6300.0	33.0
5.0	39.1	200.0	36.4	8000.0	33.6
6.3	50.6	250.0	37.1	10000.0	34.5
8.0	48.5	315.0	37.3	12500.0	35.8
10.0	48.2	400.0	38.8	16000.0	37.4
12.5	51.3	500.0	41.8	20000.0	41.1
16.0	44.9	630.0	40.1	TOT_A	46.1
20.0	47.4	800.0	34.8	TOT_C	55.6
25.0	48.6	1000.0	32.2	TOT_Lin	60.2



Rysunek 2. Wartości poziomu ciśnienia akustycznego funkcji częstotliwości w punkcie zlokalizowanym w pomieszczeniu mieszkalnym na II piętrze budynku, w czasie przejazdu samochodu ciężkiego

f[Hz]	L [dB]	f[Hz]	L [dB]	f[Hz]	L [dB]
0.8	41.9	31.5	66.3	1250.0	32.1
1.0	41.1	40.0	49.0	1600.0	31.6
1.3	44.9	50.0	44.8	2000.0	31.9
1.6	43.5	63.0	46.0	2500.0	31.7
2.0	50.7	80.0	40.8	3150.0	31.3
2.5	54.4	100.0	35.5	4000.0	32.0
3.1	58.2	125.0	38.0	5000.0	33.6
4.0	61.0	160.0	37.1	6300.0	35.2
5.0	63.2	200.0	34.0	8000.0	33.9
6.3	73.5	250.0	34.5	10000.0	34.8
8.0	68.9	315.0	35.4	12500.0	35.9
10.0	55.0	400.0	32.4	16000.0	37.4
12.5	57.5	500.0	32.9	20000.0	41.1
16.0	64.4	630.0	33.3	TOT_A	45.0
20.0	60.3	800.0	33.1	TOT_C	67.0
25.0	67.6	1000.0	33.5	TOT_Lin	76.7

PODSUMOWANIE

Źródłem wymuszenia drgań drogowych ekranów dźwiękochłonnych jest intensywny ruch samochodów z dużym udziałem ciężarowych oraz autobusów. Ekran są pobudzane do drgań poprzez złożenie naporu pierwotnej fali akustycznej, z drganiami gruntu i ewentualnymi podmuchami wiatru. Od strony drogi na wysokości badanego fragmentu ekranu znajduje się przystanek autobusowy, na którym rejestrowany jest intensywny ruch autobusów obsługujących ponad dwudzieścia linii rejsowych.

W widmach FFT rejestrowanych magnitud prędkości drgań ekranu dominuje udział niskoczęstotliwościowych drgań w przedziale od kilku do 100 Hz. Należy jednak zauważyć, że najwyższe amplitudy lokują się w 1 i 2 przedziale częstotliwości, co świadczy o relacji między charakterem wymuszeń, a częstotliwością drgań własnych konstrukcji ekranu.

W widmach FFT rejestrowanych magnitud prędkości drgań szyby okiennej dominuje udział niskoczęstotliwościowy drgań w przedziale od kilku do 150 Hz. Najwyższe amplitudy lokują się jednak w 2 przedziale słyszalnej częstotliwości (27 Hz), oraz dla 67 i 150 Hz.

Łącznie z pomiarami prowadzonymi z wykorzystaniem laserowego wibrometru skaninowego, wykonywano również pomiary poziomu ciśnienia akustycznego oraz pomiary drgań ekranu i drgań gruntu w otoczeniu ekranu. Pomiary drgań wykonano w trzech punktach:

- na powierzchni płaszczyzny ekranu,
- na filarze nośnym ekranu,
- w gruncie, ok. 2 m od ekranu,

Charakter wszystkich widm sygnałów drganiowych jest podobny, dominują w nich niskoczęstotliwościowe składniki widma. Analiza drgań powierzchni ekranu wskazuje, że energia sygnału skoncentrowana jest w paśmie do ok. 100 Hz. Energia ta jest w przybliżeniu równomiernie rozłożona z niewielką przewagą energii w paśmie 0 – 20 Hz niemniej daje się zaobserwować pojedyncze, dominujące prążki widma (ok. 12,9 Hz, 25,5 Hz, 30 Hz, 55 Hz i 59 Hz). Częstotliwości te związane są z różną postacią drgań własnych konstrukcji mechanicznej ekranu, pobudzanej do drgań przez stosunkowo szerokopasmowe wymuszenie w postaci fali akustycznej i drgań gruntu, propagujących się od strony jezdni.

Energia drgań masywnego filara nośnego ekranu w przeważającej mierze (ponad 68%) koncentruje się w paśmie 0 – 20 Hz. Ponadto, w widmie obserwuje się trzy dominujące prążki o częstotliwościach ok. 13 Hz, 33,3 Hz i 59,6 Hz.

Widmo drgań gruntu w pobliżu badanego ekranu wykazuje dużą korelację z widmem filara nośnego ekranu. Tutaj również znaczna część (ok. 66%) energii sygnału skoncentrowane jest w paśmie 0 – 20 Hz. Widmo posiada trzy dominujące prążki. Dwa z nich, o częstotliwości 12,8 Hz i 33,3 Hz posiadają swoje odpowiedniki w widmie sygnału drganiowego filara oraz prążek o częstotliwości 66,6 Hz. Wyniki badań są zgodne z oczekiwaniami, gdyż drgania gruntu w pobliżu ekranu są wynikiem przenoszenia się drgań ekranu poprzez zagłębiony w gruncie fundament.

Widma hałasu, mierzonego w punktach odległych o ok. 10 m od ekranu, wykazują na jego niskoczęstotliwościowy charakter. Znaczna część energii zawarta jest w paśmie do 128 Hz z jej maksimum skoncentrowanym w paśmie 31,5 Hz – 63 Hz. Biorąc pod uwagę charakter widm hałasu mierzonego przed ekranem (źródła hałasu) nasuwa się wniosek, że obok oczywistego zmniejszenia poziomu ciśnienia akustycznego, obserwowana jest zmiana widmowego

rozkładu energii sygnału akustycznego z wyraźnym uwypukleniem niskoczęstotliwościowych składników widma. Uśredniony poziom ciśnienia akustycznego, w paśmie do 200 Hz wahał się w granicach 72 dB – 74,5 dB.

Poziom przyspieszenia drgań gruntu, w odległości ok. 2, 5 i 20 m od ekranu był na poziomie pojedynczych $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$. Efekt oddziaływania tych drgań na środowisko, w porównaniu z poziomem niskoczęstotliwościowych sygnałów akustycznych jest pomijalny.

Badania wykonano w mieszkaniu na II p. położonego w odległości 40 m od ekranu budynku mieszkalnym. Pomiary drgań wykonywano na ścianie zewnętrznej mieszkania oraz na podłodze pomieszczenia w środku mieszkania. W wyniku analizy widmowej zarejestrowanych sygnałów nie stwierdzono korelacji z sygnałami zmierzonymi w gruncie, na zewnątrz budynku. W przypadku drgań ścian i podłogi mieszkania, stwierdzono iż widma posiadają charakter szumowy.

Porównanie procentowego udziału kolejnych przedziałów częstotliwości przy pomiarach prędkości drgań ekranu i przyspieszenia drgań w gruncie świadczy o tym, że dominującym wymuszeniem jest ciśnienie niskoczęstotliwościowych fal akustycznych.

W widmie hałasu zarejestrowanego w analizowanym pomieszczeniu mieszkalnym w czasie przejazdu samochodu ciężkiego występują, odróżnialne z tłem, składowe hałasu niskoczęstotliwościowego w zakresie od 2 do 31,5 Hz. Dla częstotliwości środkowych 25 Hz i 31,5 Hz występują przekroczenia poziomów dopuszczalnych zalecanych w instrukcji ITB. Przekroczenia te wynoszą odpowiednio 6,8 i 16,7 dB. A więc różnica pomiędzy hałasem LIN i A wynosi 31,7 dB.

Wyniki przeprowadzonych badań i ocen potwierdzają, iż źródłem tego typu uciążliwości w środowisku zewnętrznym może być ciężki transport drogowy oraz obiekty inżynierskie typu ekrany akustyczne stanowiące wtórne źródło niskoczęstotliwościowych sygnałów wibroakustycznych.

Zasadnym staje się więc zasygnalizowany na wstępie problem dotyczący określenia roli ekranów akustycznych w środowisku, oraz pytanie: czy każdy ekran akustyczny i w każdym usytuowaniu staje się elementem pożądanym przez „osoby podlegające ochronie akustycznej” i spełnia taką rolę jaką mu się przypisuje? W niektórych przypadkach efekt jest rejestrowany jedynie przez służby oceniające skuteczność ekranowania w zakresie pasma słyszalnego. Znane są, i to nie pojedyncze, przypadki osób oceniających taki sposób realizacji programu redukcji nadmiernego hałasu jako co najmniej mało satysfakcjonujący. Zaś dla części mieszkańców życie w nowych, podobno lepszych, warunkach akustycznych staje się udręką, nie do zniesienia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-N-01338:2010 Akustyka. Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy (PN-86/N-01338 Hałas infradźwiękowy. Dopuszczalne wartości poziomów ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów)
- [2] PN-ISO 7196:2002 Akustyka. Charakterystyka częstotliwościowa filtra do pomiarów ultradźwięków, (Acoustics - Frequency weighting characteristic for infrasound measurement)
- [3] H. M. El Nokrashy, Infrasound under control, <http://www.nokrashy.de/Infrasound.pdf>
- [4] G. Leventhall, Assessment and Regulation of Low Frequency Noise, <http://www.cibseashrae.org/presentations/leventhall0405.pdf>

-
- [5] Mirowska M. (2003), Badania i ocena hałasów niskoczęstotliwościowych w budynkach mieszkalnych, 50. Otwarte Seminarium z Akustyki, Oddział Górnośląski PTA
 - [6] Mirowska M. (2010), Wpływ długotrwałego oddziaływania hałasu instalacyjnego o niskim poziomie na zdrowie mieszkańców, 15th Int.Conf. on Noise Control, Wałbrzych
 - [7] PN EN ISO 16032:2006. Akustyka. Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego od urządzeń wyposażenia technicznego w budynkach. Metoda dokładna
 - [8] PN EN ISO 10052:2006(U). Akustyka. Pomiary terenowe izolacyjności od dźwięków powietrznych i uderzeniowych oraz hałasu od urządzeń wyposażenia technicznego. Metoda uproszczona
 - [9] PN-87/B-02156. Akustyka budowlana. Metody pomiaru poziomu dźwięku A w budynkach
 - [10] PN-87/B-02151/02. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach

Jakub PIECHOWICZ

BADANIA IZOLACYJNOŚCI PRZEMYSŁOWYCH EKRANÓW AKUSTYCZNYCH W WARUNKACH POŁA POGŁOSOWEGO

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Streszczenie: Właściwy dobór parametrów akustycznych ekranów przemysłowych stosowanych wewnątrz hal produkcyjnych ma istotne znaczenie w przypadku konieczności odseparowania sąsiadujących głośnych stanowisk pracy. Dla określenia właściwości akustycznych materiałów przeznaczonych do budowy konstrukcji ekranu stosowane są metody laboratoryjne, jednak są one kosztowne, wymagają właściwych laboratoriów akustycznych odpowiedniego przygotowania próbek.

W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia właściwości przemysłowych ekranów akustycznych w warunkach „in situ” czyli w miejscu gdzie będą one umiejscowione – w polu pogłosowym. Badania takie wykonywane metodami odpowiedzi impulsowej. Przedstawiono wyniki pomiarów porównawczych dla badań przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych w zespole komór pogłosowych oraz badań przeprowadzonych w warunkach „in situ”.

WSTĘP

Metody impulsowe są powszechnie stosowane w wielu rodzajach pomiarów akustycznych. Odpowiedź impulsowa przestrzeni akustycznej lub przetwornika akustycznego jest jedną z jego najważniejszych charakterystyk. Celem pozyskania odpowiedzi impulsowych danego układu (systemu) można zastosować różne techniki pomiarowe, m.in.:

- MLS (Maximum Length Sequence),
- IRS (Inverse Repeated Sequence),
- Times Stretched Pulses,
- SineSweep.

Metody te zostały opisane w literaturze [1]–[4],[6]–[8]. Niemniej jednak wybór jednej z tych metod w zależności od warunków i celu pomiaru jest ważny. Pokazano, że w obecności poniesionego poziomu tła o charakterze białego szumu, techniki MLS i IRS wydają się być bardziej dokładne. Przeciwnie, w cichym środowisku wydaje się najbardziej odpowiednia metoda Logarithmic SineSweep.

Przy założeniu nieruchomego źródła dźwięku i punktu odbioru, przestrzeń akustyczna, w której są umieszczone, może być traktowana jako układ liniowy niezmienny w czasie charakteryzujący się odpowiedzią impulsową $h(t)$.

Wykorzystanie metod odpowiedzi impulsowych ma szczególne znaczenie przy pomiarach, gdzie uzyskanie niezbędnego odstępu poziomu sygnału od poziomu zakłóceń jest trudne do uzyskania. Metody te znacznie ułatwiają dotrzymanie wymaganego odstępu bez konieczności używania źródeł o znacznych poziomach mocy akustycznej.

Przykładem takich badań są badania właściwości ekranów akustycznych w warunkach in situ.

Odpowiedni dobór materiałów o poszukiwanych właściwościach akustycznych, z których budowane są panele ekranów przeciwhałasowych pozwala na uzyskanie znaczących efektów w obniżaniu hałasu na stanowiskach pracy. Z różnych względów (zmiana składu materiału, niedokładności montażowe, brak uszczelnień itp.) są przyczyną różnic w parametrach akustycznych próbek dostarczonymi do badań laboratoryjnych, a rzeczywistymi panelami montowanymi na placu budowy.

Ekran akustyczny mogą być stosowane również wewnątrz pomieszczeń np. przemysłowych, biurowych. Stanowią elementy wyposażenia hal pozwalających na odseparowywanie poszczególnych stanowisk w celu redukcji hałasu emitowanego z tych stanowisk. W artykule przedstawiono zastosowanie metod impulsowych do weryfikacji właściwości akustycznych materiałów, zastosowanych w konstrukcjach ekranów akustycznych wewnątrz pomieszczeń. Przedstawiono sposób realizacji pomiaru oraz porównanie wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych oraz przy pomiarze tych w warunkach in situ – wewnątrz pomieszczenia.

BADANIA ELEMENTÓW PANELI EKRAŃW AKUSTYCZNYCH

Metody badań izolacyjności akustycznej, współczynnika pochłaniania dźwięku czy wskaźnika różnicy dyfrakcji na krawędzi górnej ekranu z wykorzystaniem technik impulsowych opisane były w wielu pracach [9]–[11],[13],[14]. Pomiar tych wielkości pozwalają na określenie właściwości akustycznych paneli ekranów przeciwhałasowych.

W artykule przedstawiono badania materiałów konstrukcyjnych umożliwiających zbudowanie stosunkowo lekkich, przestawnych ekranów do osłony głośnych stanowisk pracy np. spawacza. W przypadku prac prowadzonych na hali przemysłowej ekran może być ustawiany w miejscu pracy pracownika wykonującego hałaśliwe czynności lub osłaniający stanowisko o niższym poziomie hałasu. Takim elementem ścianki ekranu oddzielającego pracownika od pobliskich stanowisk pracy może być segment maty kauczukowej rozpiętej na sztywnym, metalowym stelażu lub innej konstrukcji szkieletowej.

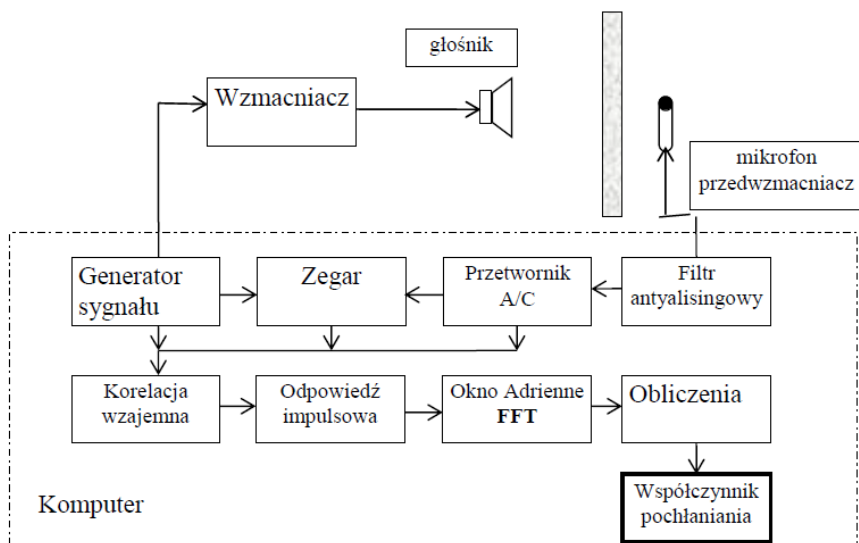


Rysunek 1. Maty kauczukowe stanowiące próbki porównawcze do badań

Do cyklu badań wybrano 4 rodzaje mat kauczukowych, różniące się grubością (6mm i 13mm) i sposobem wykończenia powierzchni (powierzchnia bez kleju oraz z klejem) – rysunek 1. Mata jest materiałem samogasnącym, nie tworzy płonących kropli oraz nierozprzestrzenia ognia, jest odporna na wilgoć, nie wchłania zapachów. W samoprzylepnych matach zastosowano strukturę złożoną z tzw. komórek zamkniętych.

Pomiary izolacyjności akustycznej w warunkach laboratoryjnych wykonano w zespole komór pogłosowych Katedry Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie zgodnie z metodyką przedstawioną w normie PN-EN ISO 10140-2:2011 [29]. Do pomiarów zastosowano okno pomiarowe o wymiarach 1m x 2m, możliwości takiego rozwiązania pokazano w [18]. W oknie przegrody rozdzielającej ściany zespołu komór pogłosowych montowano kolejno próbki wykonane z mat kauczukowych, by wyznaczyć ich izolacyjności akustyczne. Uzyskane wyniki testów posłużyły do weryfikacji poprawności przyjętej metodyki badań zastosowanej w pomiarach prowadzonych w warunkach in situ.

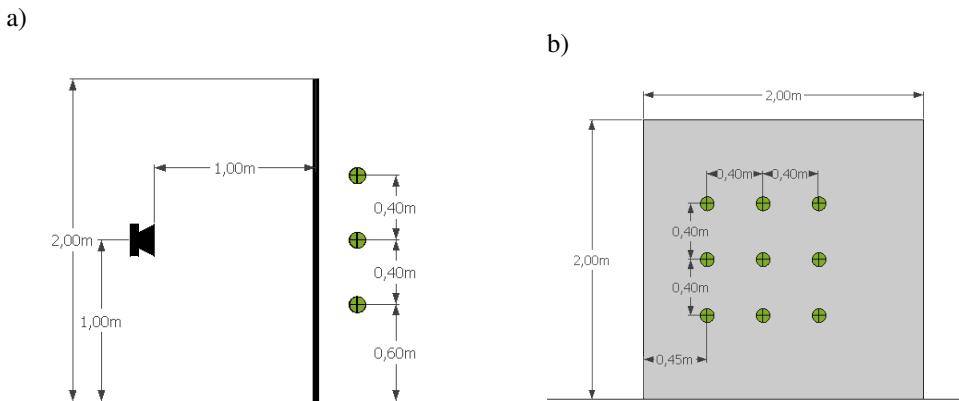
Sposób badania właściwości akustycznych ekranów w warunkach pola swobodnego opisano m.in. w [10]–[15]. Do badań wykorzystano układ pomiarowy zrealizowany według wytycznych zawartych w normach [27],[28]. Schemat toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Schemat toru pomiarowego do badań w warunkach in-situ

Konfigurację układu głośnika oraz lokacji mikrofonów przedstawiono na rysunku 3. Wyznaczanie odpowiedzi impulsowej z wykorzystaniem techniki MLS zostało po raz pierwszy zaproponowane przez Schroedera w 1979 r. [12] i jest używane do dnia dzisiejszego. W wielu pracach omówiono jej teoretyczne i praktyczne zalety i niedogodności [19]–[22]. Krótko po wdrożeniu metody MLS przez Schroedera zaproponowano technikę IRS (Inverse Repeated

Sequence) jako alternatywę pozwalającą na redukcję artefaktów zniekształceń wprowadzonych techniką MLS [4], [16],[17].



Rysunek 3. Układ punktów pomiarowych w pomiarach wskaźnika izolacyjności akustycznej

Pomiary zostały zrealizowane wewnątrz pomieszczenia o charakterze pogłosowym o wymiarach 11,5 m x 2,9 m x 2,4 m częściowo zagospodarowanego, dla którego wyznaczono czas pogłosu. Wyniki pomiaru czasu pogłosu w pasmach 1/3-oktawowych częstotliwości w pomieszczeniu badawczym przedstawiono w tabeli 1.

Tablica 1. Wartości czasu pogłosu w pasmach 1/3 oktawowych dla pomieszczenia, w którym wykonano pomiary

Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Czas pogłosu [s]	0,61	0,47	0,43	0,84	0,58	0,69	0,41	0,43	0,46
Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Czas pogłosu [s]	0,39	0,46	0,58	0,44	0,40	0,46	0,44	0,43	0,37

Przyjęta wielkość próbek pomiarowych 2m x 2m wynika z założenia weryfikacji możliwość zastosowania tej metodyki dla elementów ekranów przestawnych stanowiących wyposażenie hal przemysłowych.

Pomiary wykonano 3-krotnie dla wszystkich badanych próbek, dla każdej pozycji układu mikrofon – głośnik oraz dla pomiaru sygnału referencyjnego. W badaniach zastosowano sygnał MLS – sygnał szumu pseudolosowego, co w wyniku korelacji wzajemnej sygnałów nadanego i odebranego pozwala na wyznaczenie odpowiedzi impulsowej. Wyznaczenie wskaźnik izolacyjności dźwięku SI polega na odpowiednim dobraniu okna czasowego dla zarejestrowanych sygnałów oraz odjęcia sygnału referencyjnego od sygnału zarejestrowanego dla każdej pozycji mikrofonu. Izolacyjność akustyczną próbek materiałów wyznaczono na podstawie wzoru zdefiniowanego w normie [28]

$$SI_j = -10 \log \left\{ \frac{\sum_{k=1}^n \int |F [h_{tk}(t) w_{tk}(t)]|^2 df \left(\frac{d_k}{d_i} \right)^2}{n \cdot \int |F [h_i(t) w_i(t)]|^2 df} \right\} \quad (1)$$

gdzie:

Dif – wskaźnik dyfrakcji,

ht(f) – składowa odpowiedzi impulsowej sygnału referencyjnego,

hd_k(f) – składowa odpowiedzi impulsowej sygnału ugiętego na krawędzi ekranu w k-tym punkcie pomiarowym,

d_i, d_k – współczynniki korekcji rozbieżności geometrycznej,

w(t) – okno czasowe,

F – transformata Fouriera,

J – indeks 1/3 oktawowego pasma częstotliwości od 100 Hz do 5000 Hz,

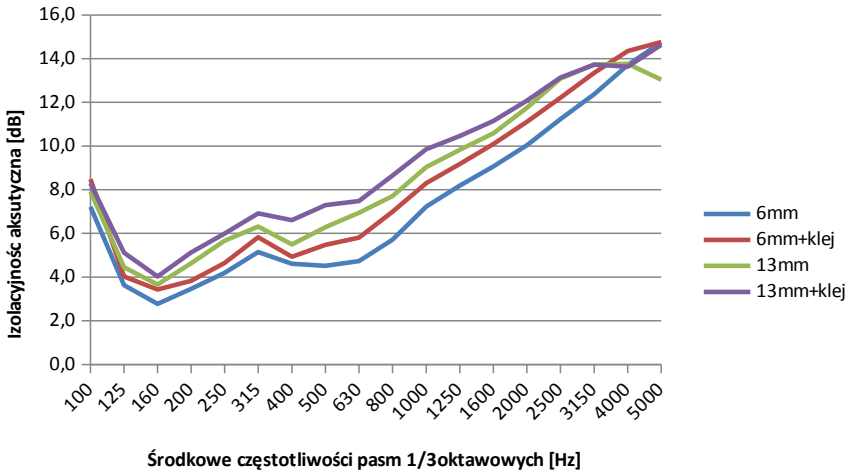
N – liczba punktów pomiarowych.

REZULTATY BADAŃ

Pierwsza seria badań obejmowała badania w warunkach laboratoryjnych – w zespole komór pogłosowych. W wyniku przeprowadzonych pomiarów wyznaczono izolacyjność akustyczną dla poszczególnych próbek, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2 oraz graficznie na rysunku 4 (przedstawione wartości są wartościami średnimi dla 3 pomiarów zrealizowanych dla każdej próbki). Uzyskane wyniki stanowią dane wyjściowe do dalszych porównań.

Tablica 2. Wyniki pomiaru izolacyjności próbek metodą laboratoryjną

Typ próbki	Częstotliwość środkowa pasm 1/3oktawowych [Hz]								
	100	125	160	200	250	315	400	500	630
6mm	7,2	3,6	2,8	3,5	4,2	5,1	4,6	4,5	4,7
6mm+klej	8,5	4,0	3,4	3,8	4,6	5,8	4,9	5,5	5,8
13mm	7,9	4,5	3,7	4,6	5,7	6,3	5,5	6,3	6,9
13mm+klej	8,3	5,1	4,0	5,1	6,0	6,9	6,6	7,3	7,5
Typ próbki	Częstotliwość środkowa pasm 1/3oktawowych [Hz]								
	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
6mm	5,7	7,2	8,2	9,1	10,0	11,2	12,4	13,7	14,7
6mm+klej	7,0	8,3	9,2	10,1	11,1	12,2	13,3	14,4	14,8
13mm	7,7	9,0	9,8	10,6	11,7	13,1	13,7	13,8	13,0
13mm+klej	8,6	9,9	10,5	11,1	12,1	13,1	13,7	13,6	14,6



Rysunek 4. Zestawienie wyników pomiaru izolacyjności akustycznej w warunkach laboratoryjnych

Wartości wskaźników jednoliczbowych izolacyjności akustycznych od dźwięków powietrznych określono na poziomie:

- $R_W = 8$ [dB] dla próbki o grubości 6mm,
- $R_W = 9$ [dB] dla próbki o grubości 6mm z klejem,
- $R_W = 10$ [dB] dla próbki o grubości 13mm,
- $R_W = 10$ [dB] dla próbki o grubości 13mm z klejem.

W drugim etapie badań zrealizowano pomiary dla tych samych próbek materiałów umieszczonych w pomieszczeniu pogłosowym. Dla każdej próbki wyznaczono izolacyjność akustyczną w pasmach 1/3 oktawowych w zakresie od 100Hz do 5000Hz.

Jednak dla pasm częstotliwości 100Hz – 600Hz wyniki pomiarów należy przyjąć jako orientacyjne. Wynika to z wymiaru próbki, dla elementów o wysokości $h=2m$ interpretacja rezultatów pomiarów może być dokonana powyżej częstotliwości $f_{min}=600$ [Hz] [28]. Uśrednione wyniki dla zbadanych próbek przedstawiono w tabeli 3 oraz na wykresie – rysunek 5.

Podane w tabelach wartości są wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie 9 kombinacji wynikających z porównania wyników pomiarów odpowiedzi impulsowych wykonanych dla danej próbki i odpowiedzi impulsowej pomiaru referencyjnego.

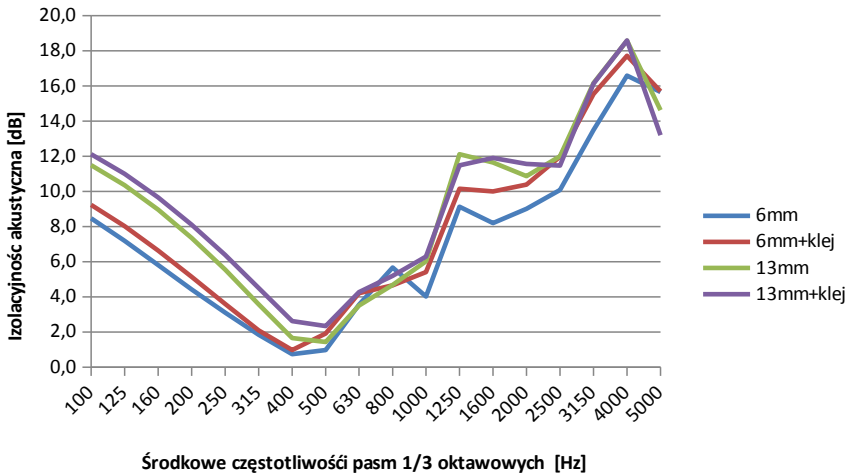
Wartości wskaźników jednoliczbowych R_W izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych:

- $R_W = 6$ [dB] dla próbki o grubości 6mm,
- $R_W = 7$ [dB] dla próbki o grubości 6mm z klejem,
- $R_W = 8$ [dB] dla próbki o grubości 13mm,
- $R_W = 8$ [dB] dla próbki o grubości 13mm z klejem.

Tablica 3. Wartości izolacyjności akustycznej w pasmach tercyjnych dla padań w polu pogłosowym

Typ próbki	Częstotliwość środkowa pasm 1/3 oktawowych [Hz]								
	100	125	160	200	250	315	400	500	630
6mm	8,5	7,2	5,8	4,4	3,1	1,8	0,7	1,0	3,6
6mm+klej	9,2	8,0	6,6	5,1	3,6	2,1	1,0	1,9	4,2
13mm	11,5	10,4	9,0	7,4	5,5	3,6	1,6	1,4	3,5
13mm+klej	12,1	11,0	9,7	8,1	6,4	4,5	2,6	2,3	4,3

Typ próbki	Częstotliwość środkowa pasm 1/3 oktawowych [Hz]								
	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
6mm	5,7	4,0	9,1	8,2	9,0	10,1	13,5	16,6	15,7
6mm+klej	4,7	5,4	10,2	10,0	10,4	12,0	15,5	17,7	15,7
13mm	4,7	6,0	12,1	11,6	10,9	12,0	16,2	18,6	14,6
13mm+klej	5,2	6,3	11,5	11,9	11,6	11,5	16,1	18,6	13,2



Rysunek 5. Zestawienie wyników pomiaru izolacyjności akustycznej w pomieszczeniu pogłosowym

ANALIZA WYNIKÓW

Badania wykonane w zespole komór pogłosowych oraz w warunkach rzeczywistego pomieszczenia miały wskazać, jakie ograniczenia występują przy stosowaniu metody w polu swobodnym i w polu częściowo rozproszonym. Wyniki pomiaru izolacyjności akustycznej próbek materiałów w zespole komór pogłosowych przyjęto jako wartości referencyjne dla każdego rodzaju materiału. Badania wykonane metodą impulsową, oznaczone jako badania in situ miały wskazać możliwość zastosowania tej metody badań w warunkach rzeczywistego pomieszczenia. W tabelach 4–7 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników wraz

z oszacowanym przedziałem niepewności standardowej dla zrealizowanych pomiarów w warunkach in situ. Ponadto przedstawiono porównanie wyników graficznie (rysunki 6–9).

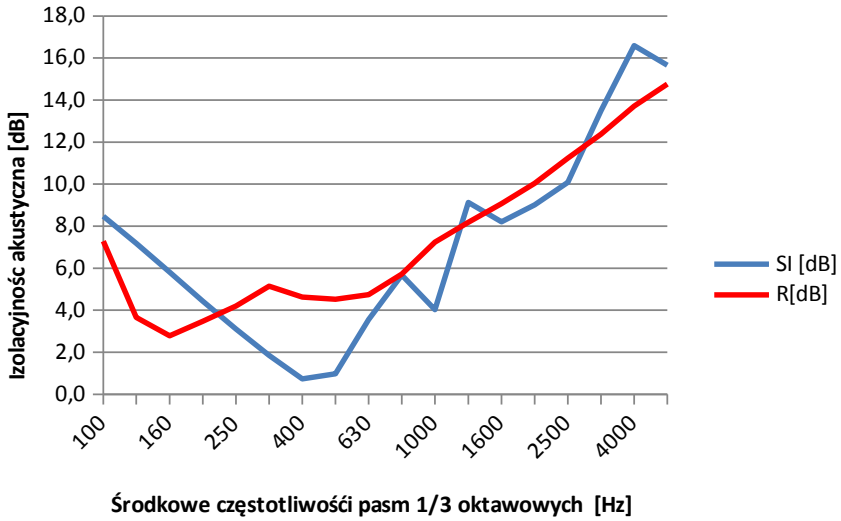
Próbka I – mata kauczukowa 6 mm

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań izolacyjności akustycznej maty kauczukowej o grubości 6 mm w pasmach 1/3 oktaawowych, wartość wskaźnika ważonego izolacyjności R_w wraz z niepewnością pomiaru $U \pm 95$. W ostatniej kolumnie tabeli pokazano różnicę pomiędzy wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych (R) i w warunkach in situ (SI).

Tablica 4. Porównanie wyników badań dla próbki o grubości 6mm

Material	Mata kauczukowa 6mm					
	Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktaawowego [Hz]	Pomiary w pomieszczeniu			Pomiary laboratoryjne	Różnica R-SI [dB]
		SI [dB]	-UA95 [dB]	+UA95 5 [dB]	R[dB]	
100	8,5	0,3	0,7	7,3	-1,2	
125	7,2	0,2	0,7	3,7	-3,5	
160	5,8	0,2	0,6	2,8	-3,0	
200	4,4	0,2	0,5	3,5	-1,0	
250	3,1	0,2	0,5	4,2	1,1	
315	1,8	0,2	0,5	5,1	3,3	
400	0,7	0,2	0,5	4,6	3,9	
500	1,0	0,2	0,5	4,5	3,6	
630	3,6	0,2	0,4	4,7	1,2	
800	5,7	0,1	0,3	5,7	0,0	
1000	4,0	0,2	0,5	7,2	3,2	
1250	9,1	0,2	0,4	8,2	-0,9	
1600	8,2	0,1	0,4	9,1	0,9	
2000	9,0	0,2	0,5	10,0	1,0	
2500	10,1	0,2	0,6	11,2	1,1	
3150	13,5	0,1	0,4	12,4	-1,1	
4000	16,6	0,2	0,5	13,7	-2,9	
5000	15,7	0,1	0,4	14,8	-0,9	
R_w	6,0			8,0	2,0	

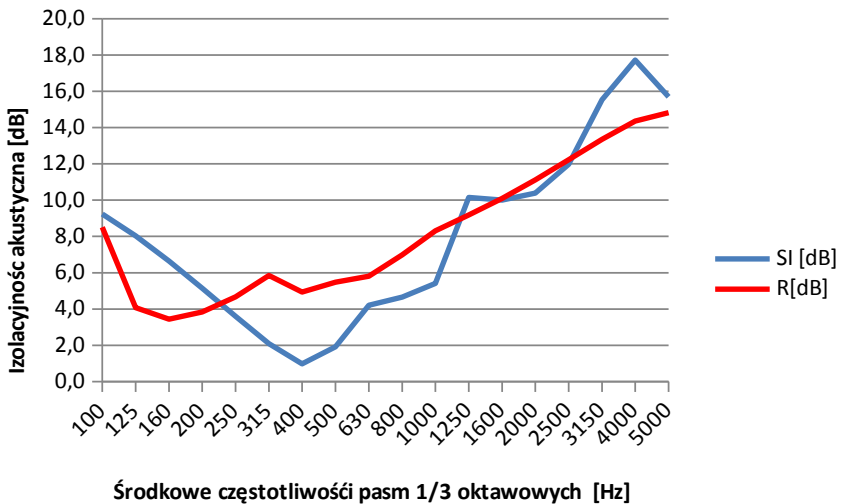
Na rysunku 6 pokazano przebiegi izolacyjności akustycznej dla maty kauczukowej o grubości 6 mm w 1/3 oktaawowych pasmach częstotliwości.



Rysunek 6. Porównanie wyników badań dla materiału o grubości 6mm

Próbka II – mata kauczukowa 6 mm z klejem

Następną próbką była mata kauczukowa grubości 6 mm z powierzchnią pokrytą klejem. Wyniki badań izolacyjności akustycznej przedstawiono w tabeli 5 oraz na rys. 7.



Rysunek 7. Porównanie wyników badań dla materiału o grubości 6mm z klejem

Tablica 5. Porównanie wyników badań dla próbki o grubości 6mm z klejem

Materiał	Mata kauczukowa 6mm + klej				
	Pomiary w pomieszczeniu			Pomiary laboratoryjne	Różnica R-SI [dB]
	SI [dB]	-UA95 [dB]	+UA95 [dB]	R[dB]	
100	9,2	0,1	0,3	8,5	-0,7
125	8,0	0,1	0,3	4,1	-4,0
160	6,6	0,1	0,3	3,4	-3,2
200	5,1	0,1	0,3	3,8	-1,3
250	3,6	0,1	0,3	4,7	1,1
315	2,1	0,1	0,3	5,9	3,8
400	1,0	0,1	0,3	4,9	4,0
500	1,9	0,1	0,3	5,5	3,6
630	4,2	0,1	0,3	5,8	1,6
800	4,7	0,1	0,3	7,0	2,3
1000	5,4	0,1	0,3	8,3	2,9
1250	10,2	0,1	0,4	9,2	-1,0
1600	10,0	0,1	0,4	10,1	0,1
2000	10,4	0,2	0,5	11,1	0,7
2500	12,0	0,1	0,3	12,2	0,2
3150	15,5	0,1	0,3	13,4	-2,2
4000	17,7	0,1	0,3	14,4	-3,4
5000	15,7	0,1	0,3	14,8	-0,9
Rw	7,0			9,0	2,0

Próbka III – mata kauczukowa 13 mm

W tabeli 6 przedstawiono wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej dla próbki o grubości 13 mm.

Tabela 6. Porównanie wyników badań dla próbki o grubości 13mm

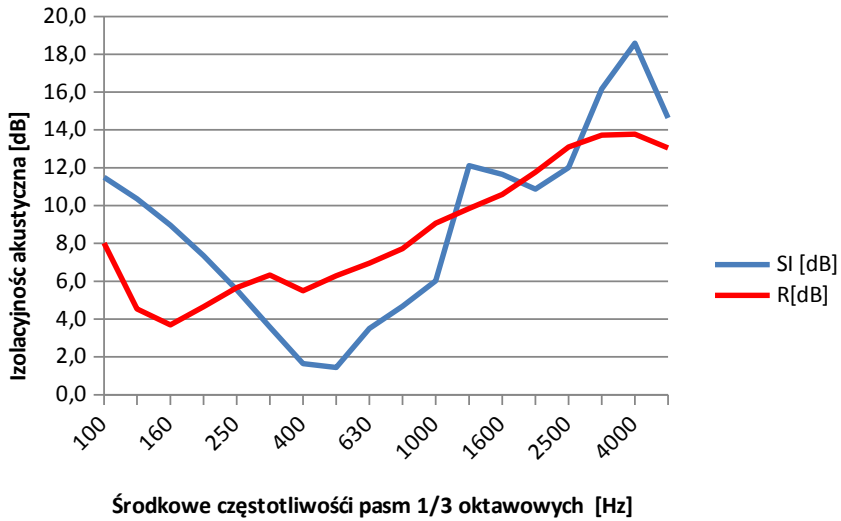
Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego [Hz]	Mata kauczukowa 13mm				
	Pomiary w pomieszczeniu			Pomiary laboratoryjne	Różnica R-SI [dB]
	SI [dB]	-UA95 [dB]	+UA95 [dB]	R[dB]	
100	11,5	0,2	0,5	8,0	-3,5
125	10,4	0,2	0,5	4,5	-5,8
160	9,0	0,2	0,5	3,7	-5,3
200	7,4	0,2	0,6	4,6	-2,7
250	5,5	0,2	0,6	5,7	0,1
315	3,6	0,2	0,7	6,3	2,7
400	1,6	0,2	0,7	5,5	3,8
500	1,4	0,2	0,6	6,3	4,9
630	3,5	0,1	0,4	6,9	3,5
800	4,7	0,2	0,4	7,7	3,0
1000	6,0	0,2	0,5	9,1	3,1
1250	12,1	0,2	0,4	9,9	-2,3
1600	11,6	0,2	0,6	10,6	-1,1
2000	10,9	0,1	0,4	11,8	0,9
2500	12,0	0,2	0,5	13,1	1,1
3150	16,2	0,3	0,7	13,7	-2,4
4000	18,6	0,3	0,7	13,8	-4,8
5000	14,6	0,2	0,6	13,0	-1,6
Rw	8,0			10,0	2,0

Na rysunku 8 pokazano przebieg izolacyjności akustycznej dla maty kauczukowej 13 mm w 1/3 oktawowych pasmach częstotliwości.

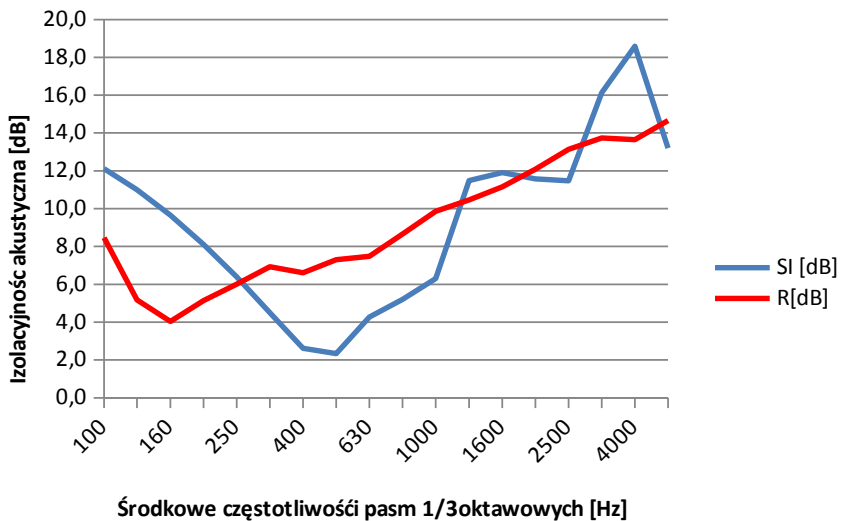
Próbka IV – mata kauczukowa 13 mm z klejem

Tabela 7 przedstawia wyniki badań izolacyjności akustycznej w pasmach 1/3 oktawowych, wartość wskaźnika ważonego izolacyjności R_w wraz z niepewnością pomiaru $U \pm 95$. W ostatniej kolumnie tabeli pokazana jest różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych (R) i w warunkach in situ (SI).

Na rysunku 9 pokazano przebiegi izolacyjności akustycznej dla maty kauczukowej 13 mm z powierzchnią z klejem w 1/3 oktawowych pasmach częstotliwości.



Rysunek 8. Porównanie wyników badań dla materiału o grubości 13mm



Rysunek 9. Porównanie wyników badań dla materiału o grubości 13mm z klejem

Tablica 7. Porównanie wyników badań dla próbki o grubości 13mm z klejem

Material	13mm + klej				
	Pomiary w pomieszczeniu			Pomiary laboratoryjne	Różnica R-SI [dB]
	SI [dB]	-UA95 [dB]	+UA95 [dB]	R[dB]	
Częstotliwość środkowa pasma 1/3 oktawowego [Hz]					
100	12,1	0,1	0,3	8,5	-3,6
125	11,0	0,1	0,3	5,2	-5,8
160	9,7	0,1	0,3	4,0	-5,6
200	8,1	0,1	0,3	5,1	-3,0
250	6,4	0,1	0,3	6,0	-0,4
315	4,5	0,1	0,4	6,9	2,4
400	2,6	0,2	0,5	6,6	4,0
500	2,3	0,2	0,4	7,3	5,0
630	4,3	0,1	0,3	7,5	3,2
800	5,2	0,1	0,4	8,7	3,5
1000	6,3	0,2	0,4	9,9	3,6
1250	11,5	0,2	0,6	10,5	-1,0
1600	11,9	0,2	0,6	11,1	-0,8
2000	11,6	0,2	0,5	12,1	0,5
2500	11,5	0,2	0,5	13,1	1,7
3150	16,1	0,2	0,6	13,7	-2,4
4000	18,6	0,2	0,5	13,7	-4,9
5000	13,2	0,2	0,5	14,7	1,5
Rw	8,0			10,0	2,0

Porównując dane liczbowe dla poszczególnych próbek materiałów można stwierdzić, że uzyskane różnymi metodami wartości izolacyjności akustycznej są do siebie zbliżone. Zauważalne różnice występują dla wartości poniżej $f=600$ [Hz]. Jak wcześniej wspomniano w tym zakresie częstotliwości wyniki uzyskane w pomiarach metodą impulsową nie powinny być interpretowane ze względu na bliskość innych powierzchni odbijających dźwięk. Dodatkowo zauważalna jest duża rozbieżność wyników pomiarów w paśmie o częstotliwości środkowej $f = 4000$ [Hz]. Z uwagi na długość fali około 8,5 cm nie można wskazać jednoznacznej przyczyny tego zjawiska.

Porównując różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach in situ obserwujemy zbieżność, co do charakteru krzywej oraz stałą różnicę przy wyznaczeniu jednoizbowego wskaźnika izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych. W każdym z zaobserwowanych przypadków różnica ta wynosi 2 dB.

Analizując uzyskane wartości przedziałów niepewności stwierdzono, że przeprowadzone pomiary wykazują powtarzalność, co pozwala na wstępne założenie powtarzalności rezultatów prowadzonych badań.

WNIOSKI

Podsumowując, przedstawiony problem można stwierdzić, że wskazywane w literaturze [10],[11],[13] uwarunkowania w zakresie możliwości stosowania opisanej metodyki tylko przy pomiarach w polu swobodnym nie mają odzwierciedlenia w uzyskanych wynikach. Koncepcja zastosowanej metodyki wymaga analizy możliwości i skuteczności wprowadzanych zmian, jednak w aspekcie ideowym zastosowania metod impulsowych oraz metod subtrakcji sygnałów przy badaniach prowadzonych w polu pogłosowym wykazuje potencjał dla dalszych badań w tym zakresie.

Wskazane wnioski w odniesieniu do przyszłych badań mogą potencjalnie wskazać właściwą drogę do usprawnienia i wdrożenia do zastosowania omawianej metody.

Wnioski w zakresie przyszłych badań:

- Weryfikacja możliwości zmian układu geometrycznego dla rozszerzenia zakresu uzyskiwanych wyników w odniesieniu do pasm częstotliwości poniżej $f=600$ Hz,
- Zastąpienie pojedynczego mikrofonu matrycą mikrofonową, co pozwoli na zwiększenie dokładności lokalizowania punktów pomiarowych oraz dokładniejszego odwzorowania układu pomiarowego dla sygnału pomiarowego i sygnału referencyjnego,
- Analiza możliwości zastosowania metody dla określenia innych właściwości materiałów jak np. współczynnika pochłaniania dźwięku.

Przeprowadzone badania mają na celu określenie możliwości zastosowania metod opisanych w normach [27],[28] do oceny parametrów akustycznych – w tym przypadku izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych – w przypadku pomiarów realizowanych wewnątrz pomieszczeń – w polu częściowo-rozproszonym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alrutz H., Schroeder M.R., "A fast hadamard transform method for the evaluation of measurements using pseudorandom test signals," Proc. 11th Int. Conf. on Acoust., Paris, pp. 235–238, 1983.
- [2] Bleakley C., Scaife R., "New formulas for predicting the accuracy of acoustical measurements made in noisy environments using the averaged m-sequence correlation technique," vol. 97, no. 2, pp. 1329–1332, 1995.
- [3] Borish J., J. B. Angell, "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudo-random noise," vol. 31, no. 7, pp. 478–487, 1983.
- [4] Burkard R., Y. Shi, and K. E. Hecox, "A comparison of maximum length and legendre sequences for the derivation of brain-stem auditory-evoked responses at rapid rates of stimulation," vol. 87, no. 4, pp. 1656–1664, 1990.
- [5] Clairbois J-P., Beaumont J, Garai M, Schupp G, 1998, A new in situ method for the acoustics performance of road traffic noise reducing devices. Proc. ICA/ASA 98, Seattle, USA, pp. 471-472.
- [6] Cohn M., Lempel A., "On fast m-sequence transforms," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-23, pp.135–137, 1977.
- [7] Davies W. D. T., "Generation and properties of maximum-length sequences," Control, pp. 302–304, 364–365, 431–433, 1966.
- [8] Dunn C., Hawksford M.O., "Distortion immunity of mls-derived impulse response measurements," vol. 41, no. 5, pp. 314–335, 1993.
- [9] Garai M, 1993, Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: the reflection method using periodic pseudo-random sequences of maximum length, Appl. Acoust. vol. 39, pp.119-39.
- [10] Garai M., Guidorzi P. Experimental verification of the European methodology for testing noise barriers in situ: airborne sound insulation, Inter-Noise 2000.
- [11] Garai M., Guidorzi P., 2000, European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: experimental verification and comparison with laboratory data, J. Acoust. Soc. Am., vol.108(3), pp.1054-1067.
- [12] Schroeder M.R., Integrated-impulse method for measuring sound decay without using impulses, The Journal of the Acoustical Society of America vol. 66, no 2, 497 – 500, 1979.
- [13] Mommertz E, 1995, Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique, Appl. Acoust. vol. 46, pp.251-263.
- [14] Piechowicz J., 2010, In situ studies of sound insulation index of noise barriers, Mechanics and Control vol. 29 no. 4, pp. 179–183.
- [15] Ream N., "Nonlinear identification using inverse-repeat m sequences," Proc. IEE(London), vol. 117, pp. 213–218, 1970.
- [16] Rife D.D. and J. Vanderkooy, "Transfer function measurement with maximum-length sequences," vol. 37, no. 6, pp. 419–443, 1989.
- [17] Rife D.D., "Modulation transfer function measurement with maximum-length sequences," vol. 40, no. 10, pp. 779–789, 1992.
- [18] Sikora J. Stanowisko do badań właściwości dźwiękoizolacyjnych przegród o małych wymiarach Czasopismo techniczne 5-M/2011 z.15 rok 108, wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [19] Simpson H.R., "Statistical properties of a class of pseudorandom sequences," Proc. IEEE (London), vol. 133, pp. 2075–2080, 1966.
- [20] Stan G.B., Embrechts J.J., Archambeau D., Comparison of different impulse response measurement techniques , - Journal of the Audio Engineering . . . , 2002.
- [21] Vanderkooy J., "Aspects of mls measuring systems," vol. 42, no. 4, pp. 219–231, 1994.
- [22] Vorländer M., Kob M., "Practical aspects of mls measurements in building acoustics," Applied Acoustics, vol. 52, no. 3/4, pp. 239–258, 1997.

-
- [23] Watts G.R., 1997, In situ method for determining the transmission loss of noise barriers, *Appl Acoust* vol.51(4), pp. 421–438.
- [24] PN-EN 1793-1:2017-05. Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Metoda oznaczania właściwości akustycznych – Część 1: Podstawowe właściwości pochłaniania dźwięku w warunkach rozproszonego pola akustycznego”
- [25] PN-EN 1793-2:2013-05. Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Metoda oznaczania właściwości akustycznych – Część 2: Podstawowe właściwości izolacji od dźwięków powietrznych w warunkach dźwięku rozproszonego”
- [26] PN-EN 1793-3:2001 Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Metoda badania w celu wyznaczenia właściwości akustycznych – Część 3: Znormalizowane widmo hałasu drogowego”.
- [27] PN EN 1793-4 (2002). “Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance – Part 4: Intrinsic characteristics – In situ values of sound diffraction
- [28] PN-EN 1793-6:2013-05. Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Metoda oznaczania właściwości akustycznych – Część 6: Podstawowe właściwości – Skuteczność izolacji od dźwięków powietrznych w warunkach dźwiękowych in situ”
- [29] PN-EN ISO 10140-2:2011. Akustyka – Pomiar laboratoryjny izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 2: Pomiar izolacyjności od dźwięków powietrznych

*Bożena SMAGOWSKA, Dariusz PLEBAN, Emil KOZŁOWSKI, Witold
MIKULSKI*

NARAŻENIE NA HAŁAS W ZAKŁADACH OPAKOWAŃ METALOWYCH

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
e-mail: bosma@ciop.pl*

Streszczenie: Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) w Polsce jest ok. 8 tys. zakładów wytwarzających opakowania. W większości są to małe i średnie firmy, wytwarzające opakowania z drewna, z tworzyw sztucznych; z papieru i tektury; z metalu, szkła i materiałów tekstylnych. W niniejszym opracowaniu zamieszczono wyniki pomiarów i oceny narażenia na hałas w zakresie częstotliwości infradźwiękowych, słyszalnych i ultradźwiękowych przeprowadzonych na wybranych stanowiskach pracy w zakładach produkujących elementy opakowań lub opakowania z metalu. Podano przykład ograniczenia ekspozycji na hałas na stanowiskach pracy w zakładzie produkującym puszki metalowe poprzez dobór ochronników słuchu oraz omówiono działania organizacyjno-techniczne mających na celu ograniczenie narażenia na hałas w tym środowisku pracy.

WPROWADZENIE

Na podstawie nielicznych danych literaturowych dotyczących oceny pracy w zakładach produkcji opakowań, w tym warunków akustycznych oraz ryzyka zawodowego wynikającego z narażenia na hałas na stanowiskach pracy stwierdzono, że najwięcej zagrożeń wiąże się z nadmiernym hałasem, eksploatacją maszyn, łącznym oddziaływaniem czynników szkodliwych oraz pracą zmianową [1]–[5]. Wg danych GUS w 2016 r. 268,0 tys. osób liczonych raz w grupie czynnika przeważającego pracowało w warunkach zagrożenia czynnikami związanymi ze środowiskiem pracy [6]. Spośród tych czynników największe zagrożenie stanowił hałas [7]. Natomiast jak wynika z informacji Polskiej Izby Opakowań w sferze produkcji opakowań zatrudnionych jest ok. 230 tys. osób [8] w około 8 tys. zakładach wytwarzających opakowania [9]. Wśród działań zmierzających do poprawy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników szczególną rolę odgrywa ocena ryzyka zawodowego [10,11] której zasady na stanowiskach pracy opisuje norma PN-N-18002:2000 [12]. Ocena ta stanowi podstawę do działań służących zapobieganiu wypadkom i chorobom powodowanymi zagrożeniami występującymi w środowisku pracy [13,14]. Jedną z metod oceny ryzyka zawodowego wynikającego z zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy są pomiary wartości wielkości charakteryzujących hałas. W odniesieniu do stanowisk pracy dla których występuje przekroczenie wartości NDN hałasu, na mocy §5.2 rozporządzenia [13] pracodawca zobowiązany jest do podjęcia działań organizacyjno-technicznych mających na celu ograniczenie narażenia na hałas w środowisku pracy. Najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem tego ograniczenia jest stosowanie środków ochrony indywidualnej, które zmniejszają ilość energii akustycznej docierającej do ucha pracownika. W środowisku pracy ochronników słuchu używa się w sytuacji kiedy nie jest możliwe ograniczenie narażenia na hałas metodami

techniczno–organizacyjnymi lub kiedy ekspozycja występuje rzadko (np. okresowe wejście do pomieszczenia w celu kontroli hałaśliwego urządzenia).

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów i oceny narażenia na hałas w zakresie częstotliwości infradźwiękowych, słyszalnych i ultradźwiękowych przeprowadzonych na wybranych stanowiskach pracy w zakładach produkujących elementy opakowań lub opakowania z metalu. Zamieszczono przykład ograniczenia ekspozycji na hałas na stanowiskach pracy w zakładzie produkującym puszki metalowe poprzez dobór ochronników słuchu. Pomiary hałasu przeprowadzono metodą pośrednią zgodną z wymaganiami zawartymi w normach: PN-EN ISO 9612: 2011, PN-N-01307: 1994 i PN-EN PN-N-01338: 2010 [15]–[17] oraz w zaktualizowanej procedurze pomiarowej [18].

OBIEKT I METODA BADAŃ

Ocenę narażenia na hałas przeprowadzono w dwóch zakładach produkujących elementy metalowe do opakowań: w zakładzie produkującym wieczka jedno i dwuelementowe do słoików oraz w zakładzie produkującym wieczka do puszek. Przykład doboru ochronników słuchu przeprowadzono na stanowiskach pracy w zakładzie produkującym puszki metalowe na podstawie zmierzonych widm hałasu. Na Rys.1 przedstawiono linię transportu wieczek do słoików. W przypadku pierwszego z w/w zakładów pomiary hałasu przeprowadzono na stanowiskach pracy obsługujących linię do produkcji wieczek metalowych (jedno i dwuelementowych) oraz na stanowiskach prac koncepcyjnych znajdujących się w pomieszczeniach przylegających (wydzielonych) do hali produkcyjnej.



Rysunek 1. Linia transportu wieczek do słoików

Natomiast stanowiska pras (do cięcia blach na wstęgi i wycinania wieczek) oraz na stanowiska automatów do uszczelniania wieczek były obiektami badań w przypadku drugiego

z w/w zakładów. Pomieszczenia zakładów, w których odbywała się produkcja nie posiadały adaptacji akustycznej.

Zgodnie z rozporządzeniem ministra pracy i polityki społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. [14], hałas w środowisku pracy jest charakteryzowany przez:

- poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, $L_{EX,8h}$, lub poziom ekspozycji na hałas odniesiony do przeciętnego tygodniowego, określonego w kodeksie pracy, wymiaru czasu, $L_{EX,w}$ (wyjątkowo w przypadku hałasu oddziałującego na organizm człowieka w sposób nierównomierny w poszczególnych dniach w tygodniu),
- maksymalny poziom dźwięku A, L_{Amax} ,
- szczytowy poziom dźwięku C, L_{Cpeak} .

Poziom ekspozycji na hałas definiowany jest jako równoważny (uśredniony energetycznie) poziom dźwięku A, w dB, wyznaczony dla czasu ekspozycji na hałas T_e , odniesiony do znormalizowanego czasu T_o (tj. dla 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy) i określony odpowiednim wzorem (1):

$$L_{EX,8h} = L_{p,A,eq,T_e} + 10 \lg \frac{T_e}{T_o} \quad (1)$$

gdzie:

L_{p,A,eq,T_e} — równoważny poziom dźwięku A wyznaczony dla czasu ekspozycji T_e , w dB,

T_e — czas ekspozycji, w s,

T_o — czas odniesienia = 8 h = 28800 s,

i — kolejny dzień roboczy w rozważanym tygodniu,

n — liczba dni roboczych w rozważanym tygodniu (może być różna od 5).

Ocena narażenia na hałas w środowisku pracy polega na porównaniu zmierzonych lub wyznaczonych wartości wielkości charakteryzujących hałas z wartościami najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) hałasu (określonymi ze względu na ochronę słuchu), które zamieszczono w ww. rozporządzeniu [14]. Wartości dopuszczalne hałasu ze względu na możliwość realizacji przez pracowników podstawowych zadań (a więc po uwzględnieniu pozasłuchowych skutków działania hałasu – kryterium uciążliwości) na wybranych typach stanowisk określa Polska Norma PN-N-01307: 1994 [16]. Podstawą oceny narażenia na hałas (w zakresie częstotliwości słyszalnych 20 Hz – 20 000 Hz) są pomiary: równoważnego poziomu dźwięku A ($L_{Aeq,T}$), maksymalnego poziomu dźwięku A (L_{Amax}) i szczytowego poziomu dźwięku C (L_{Cpeak}) [12]. Metody pomiaru tych wielkości są określone w polskich normach [15,17].

W przypadku hałasu ultradźwiękowego (zakres częstotliwości 10 kHz – 40 kHz) ocenę narażenia przeprowadza się na podstawie pomiarów równoważnych i maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego [14]. Pomiary hałasu ultradźwiękowego przeprowadza się metodą określoną w zaktualizowanej procedurze pomiarowej [18] oraz zgodnie z wymaganiami zawartymi w ww. rozporządzeniu [14]. Zgodnie z nim wyznacza się następujące wielkości fizyczne charakteryzujące hałas ultradźwiękowy:

- równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 kHz do 40 kHz, odniesione do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu

pracy ($L_{feq,8h}$) lub równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 kHz do 40 kHz odniesione do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, określonego w ustawie z dnia 1974 r. – Kodeks pracy (wyjątkowo w przypadku oddziaływania hałasu ultradźwiękowego na organizm człowieka w sposób nierównomierny w poszczególnych dniach w tygodniu),

- maksymalne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 kHz do 40 kHz, (L_{fmax}).

W zakresie pomiarów i oceny uciążliwości hałasu infradźwiękowego (2 Hz – 20 Hz) stosowana jest norma PN-N-01338: 2010 [17]. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w tej normie do pomiarów i oceny uciążliwości hałasu infradźwiękowego stosowany jest równoważny poziom dźwięku G.

W celu określenia narażenia na hałas pracowników na wybranych stanowiskach pracy w zakładach opakowań metalowych przeprowadzono pomiary wielkości charakteryzujących hałas w zakresie częstotliwości infradźwiękowych, słyszalnych i ultradźwiękowych. Pomiary te wykonano za pomocą analizatorów dźwięku Svan 945 oraz 979 firmy Svantek oraz mikrofonów o średnicy 1/2 i 1/4 cala. Punkty pomiarowe, w zależności od rodzaju stanowiska, były zlokalizowane w miejscach przebywania pracowników na stanowiskach pracy w odległościach od 0,5 do 1 m od urządzeń.

WYNIKI BADAŃ ŚRODOWISKOWYCH

Pomiary poziomu hałasu w zakładzie produkcyjnym wieczek jedno- i dwu-elementowych przeprowadzono na stanowiskach pracy obsługi linii produkcyjnych wieczek, pakowania wyrobów i pracy biurowej (planiści). Wyniki te zamieszczono w tabelach 1–3 (w zakresie częstotliwości słyszalnych, infradźwiękowych i ultradźwiękowych).

Na podstawie wyników pomiarów stwierdza się, że na stanowiskach pracy z wyjątkiem stanowisk pracy biurowej poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy zawiera się w zakresie od 70,5 dB do 98,9 dB, zmierzone maksymalne poziomy ciśnienia wahają się od 77,3 dB do 104,5 dB natomiast szczytowy poziom dźwięku C wynosi w granicach 100,1 dB do 122,1 dB. Na wszystkich tych stanowiskach pracy poziom ekspozycji na hałas przekracza wartość dopuszczalną 85 dB. Wyjątek stanowią stanowisko pakowania (nr 5 w tab. 1) i stanowiska kontrolera procesu linii produkcyjnej znajdującego się w kabinie (nr 8 w tab.1). Zmierzony równoważny poziom dźwięku A w czasie pobytu na stanowisku nr 8 wynosił 75,1 dB i przekraczał kryterium uciążliwości hałasu (65 dB). Pozostałe wartości dopuszczalne maksymalnego poziomu dźwięku A oraz szczytowego poziomu dźwięku C określone ze względu na ochronę słuchu nie są przekroczone.

Wyniki pomiaru hałasu w zakresie częstotliwości słyszalnych i infradźwiękowych na stanowiskach pracy biurowej zamieszczone w tabeli 2 wskazują na przekroczenie poziomu dźwięku A ze względu na rodzaj wykonywanej pracy [16] oraz w zakresie hałasu infradźwiękowego przekroczenie wartości dopuszczalnej (86 dB) stanowiącej kryterium uciążliwości.

Na podstawie wyników pomiaru hałasu w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych (tab. 3) stwierdza się, że zmierzone wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy operatora prasy przekraczają wartości dopuszczalne określone dla tercjowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych: 10 kHz, 12,5 kHz i 16 kHz. Na innych

stanowiskach pracy zmierzone wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego osiągały wartość poniżej 73 dB dla tercjowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych: 10 kHz, 12,5 kHz i 16 kHz.

Tablica 1. Wyniki pomiaru hałasu na stanowiskach pracy w zakładzie produkcji wieczek jedno- i dwu-elementowych

Stanowisko pracy	$L_{EX,8h}$ [dB]	$L_{EX,8h,dop}$ [dB]	L_{Amax} [dB]	$L_{Amax,dop}$ [dB]	L_{Cpeak} [dB]	$L_{Cpeak,dop}$ [dB]	L_{Geq} [dB]	$L_{Geq,dop}$ [dB]
nastawiacz produkcji wieczek - prasa CP05	94,9	85	98,7	115	118,0	135	82,2	102
nastawiacz na produkcji wieczek dwuelementowych i operator linii CP45	91,0		95,2		114,0		84,4	
nastawiacz (produkcja wieczek TO $\phi 63$)	93,1		98,7		117,8		83,5	
pakowacz	80,0		84,2		102		79,6	
operator prasy i linii produkcyjnych	98,9		104,5		122,1		94,4	
operator prasy konwersyjnej	93,0		100,1		117,3		89,9	
nastawiacz i kontroler procesu (linia TP - CP32)	91,0		96,4		113,7		85,1	
nastawiacz i kontroler procesu (linia TP - CP32) – stanowisko w kabinie	70,5		77,3		100,1		78,5	
sortowanie i pakowanie - linia TP	86,7		87,8		106,5		79,4	
sortowanie i pakowanie - linia CP32	85,1		88		106,9		80,2	

Oznaczenia do tabeli 1 są następujące:

$L_{EX,8h}$ – poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy,

$L_{EX,8h,dop}$ – dopuszczalny poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy,

L_{Amax} – maksymalny poziom dźwięku A,

$L_{Amax,dop}$ – dopuszczalny maksymalny poziom dźwięku A,

L_{Cpeak} – szczytowy poziom dźwięku C,

$L_{Cpeak,dop}$ – dopuszczalny szczytowy poziom dźwięku C,

L_{Geq} – poziom dźwięku G,

$L_{Geq,dop}$ – dopuszczalny poziom dźwięku G.

Tablica 2. Wyniki pomiaru hałasu na stanowiskach pracy koncepcyjnej w zakładzie produkcji wieczek jedno i dwu-elementowych

Stanowisko pracy	$L_{Aeq,tj}$ [dB]	L_{Amax} [dB]	$L_{Amax,dop}$ [dB]	L_{Cpeak} [dB]	$L_{Cpeak,dop}$ [dB]	L_{Geq} [dB]	$L_{Geq,dop}$ [dB]
Praca biurowa (w kabinie przy stanowisku pakowania)	65,8	73	115	102	135	88,5	86
Praca biurowa - plانیści (w kabinie przy prasach)	65,1	67		89,2		83,7	

Oznaczenia do tabeli 2:

$L_{Aeq,tj}$ – równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy w czasie tj,

L_{Amax} – maksymalny poziom dźwięku A,

$L_{Amax,dop}$ – dopuszczalny maksymalny poziom dźwięku A,

L_{Cpeak} – szczytowy poziom dźwięku C,

$L_{Cpeak,dop}$ – dopuszczalny szczytowy poziom dźwięku C,

L_{Geq} – poziom dźwięku G,

$L_{Geq,dop}$ – dopuszczalny poziom dźwięku G.

Tablica 3. Wyniki hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy operatorów linii produkcyjnej oraz operatora prasy

Stanowisko pracy	Wielkość [dB]	Częstotliwość środkowa pasma tercjowego f [kHz]						
		10	12,5	16	20	25	31,5	40
Operator linii produkcyjnej wieczek dwuelementowych	$L_{fi,eq,Te}$	79,7	79,6	79,8	80,2	80,5	80,1	78,7
	$L_{fi,max,Te}$	87,3	86,5	87,2	89,3	90,7	89,1	88,3
Operator prasy	$L_{fi,eq,Te}$	82,7	82,3	82,9	83,1	81,8	81,2	80,4
	$L_{fi,max,Te}$	88,95	87,5	88,9	88,9	85,75	84,2	82,3

Oznaczenia do tabeli 3:

$L_{fi,eq,Te}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w pasmie tercjowym o częstotliwości środkowej f_i odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy Te ,

$L_{fi,max,Te}$ – maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w pasmie tercjowym o częstotliwości środkowej f_i odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy Te .

Pomiary wielkości charakteryzujące hałas w zakładzie produkującym wieczka do puszek przeprowadzono na wybranych stanowiskach pracy obsługi pras (do cięcia blachy, do wycinania wieczek oraz do wycinania wieczek i mocowania kluczyka) oraz linii do uszczelniania wieczek. Wyniki poziomu hałasu (w zakresie częstotliwości słyszalnych, i ultradźwiękowych) zamieszczono w tabelach 4 i 5.

Na podstawie wyników pomiarów hałasu (tab.4) stwierdza się, że poziomy ekspozycji na hałas odniesione do 8-godzinnego dnia pracy zawierają się w zakresie od 88 dB do 111 dB, maksymalne poziomy dźwięku A wahają się od 90,6 dB do 108,3 dB natomiast szczytowy

poziom dźwięku C wynosi w granicach 105,9 dB do 128,5 dB. Na wszystkich badanych stanowiskach pracy poziom ekspozycji na hałas przekracza wartość dopuszczalną 85 dB. Wartości dopuszczalne maksymalnego poziomu dźwięku A oraz szczytowego poziomu dźwięku C określone ze względu na ochronę słuchu nie są przekroczone.

Z kolei wyniki pomiaru hałasu ultradźwiękowego (tab. 5) wskazują, że zmierzone wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy operatora automatów do uszczelniania wieczek przekraczają wartości dopuszczalne określone dla tercjowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych: 10 kHz, 12,5 kHz i 16 kHz.

Tablica 4. Wyniki pomiaru hałasu na stanowiskach pracy w zakładzie produkcyjnym wieczek do puszek

Lp.	Stanowisko pracy	$L_{EX,8h}$ [dB]	$L_{EX,8h,dop}$ [dB]	L_{Amax} [dB]	$L_{Amax,dop}$ [dB]	L_{Cpeak} [dB]	$L_{Cpeak,dop}$ [dB]
1.	Operator prasy CDL (cięcie blachy)	111	85	105,0	115	123,5	135
2.	Operator prasy Shell (wycinanie wieczek)	110		108,3		128,5	
3.	Operator prasy z obudową (wycinanie wieczek i łączenia kluczyka)	101		100,5		118,5	
4.	Operator automatu nr 1 do uszczelniania wieczek	88,0		95,4		107,0	
5.	Operator automatu nr 2 do uszczelniania wieczek	87,9		90,6		105,9	

Oznaczenia do tabeli 4:

$L_{EX,8h}$ – poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego, dobowego wymiaru czasu pracy,

L_{Amax} – maksymalny poziom dźwięku A,

L_{Cpeak} – szczytowy poziom dźwięku C.

Tablica 5. Wyniki pomiaru hałasu ultradźwiękowego w zakładzie produkcyjnym wieczek do puszek

Stanowisko pracy	Wielkość [dB]	Częstotliwość środkowa pasma tercjowego f [kHz]						
		10	12,5	16	20	25	31,5	40
Operator automatów do uszczelniania wieczek	$L_{fi,eq,Te}$	92,9	90,5	91,6	90,8	90,1	94	88,3
	$L_{fi,max,Te}$	106,3	105,1	104,7	104,2	103,3	104,77	95,9

Oznaczenia do tabeli 5:

$L_{fi,eq,Te}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w pasmie tercjowym o częstotliwości środkowej f_i odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy Te ,

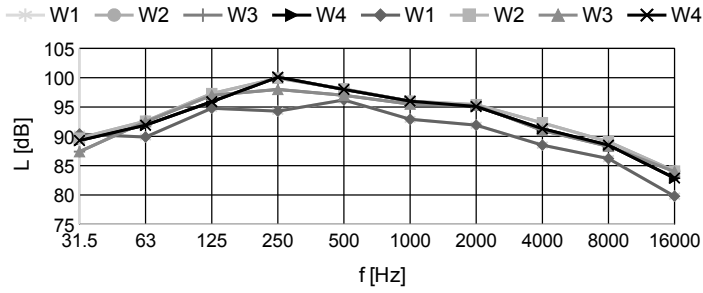
$L_{fi,max,Te}$ – maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w pasmie tercjowym o częstotliwości środkowej f_i odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy Te .

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że źródłami nadmiernego hałasu w zakładach opakowań są przede wszystkim maszyny i urządzenia, w tym układy napędowe i elementy sprężonego powietrza. Poza tym na liniach transportowych, w wyniku przemieszczania się półwyrobów, występuje hałas uderzeniowy przyczyniając się do wzrostu poziomu hałasu. Istotny wpływ na poziom hałasu miało także stwierdzone niewłaściwe rozmieszczenie maszyn i stanowisk w halach produkcyjnych powodujące przenikanie hałasu na sąsiednie stanowiska pracy (przykładowo stanowiska odbioru wyrobów gotowych znajdowały się w pobliżu hałaśliwych linii technologicznych). Skutkiem tego, narażenie na hałas pracowników na stanowiskach pracy wynosi powyżej wartości NDN hałasu. W tym przypadku należy bezwzględnie zastosować środki ochrony indywidualnej – ochronniki słuchu, gdyż nie było możliwe uniknięcie lub wyeliminowanie ryzyka zawodowego wynikającego z narażenia na hałas za pomocą środków ochrony zbiorowej lub organizacji pracy.

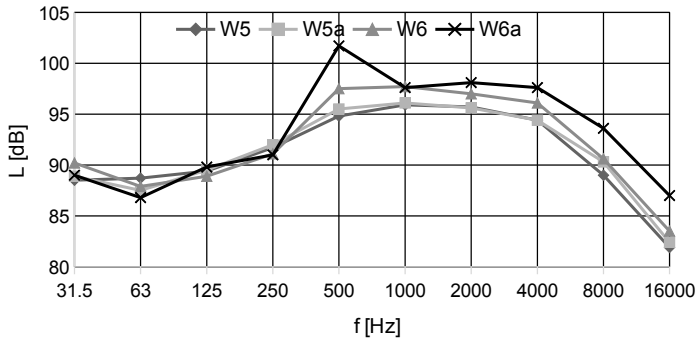
Ochronniki słuchu powinny być odpowiednio dobrane do widma hałasu występującego na stanowisku pracy [19]. Podstawą tego doboru jest oszacowanie spodziewanego poziomu dźwięku pod ochronnikiem słuchu na podstawie parametrów tłumieniowych ochronników słuchu i wyników pomiarów hałasu na stanowisku pracy [20]. Przykładem takiego doboru są stanowiska pracy w zakładzie produkcji puszek metalowych. Doboru ochronników dokonano na podstawie widm (W1-W16) hałasu zmierzonych na następujących stanowiskach pracy: prasach poziomych (W1-W4), dekoratorach (W5-W6a), natryskiwarkach (W7-W10), szyjkownicach (W11-W14, W16) i paletyzatorze (W15). Widma hałasu zmierzone na stanowiskach pracy przedstawiono w tabeli 6 i na rysunkach 2–6.

Tablica 6. Widma hałasu na stanowiskach pracy zmierzone w celu doboru ochronników słuchu

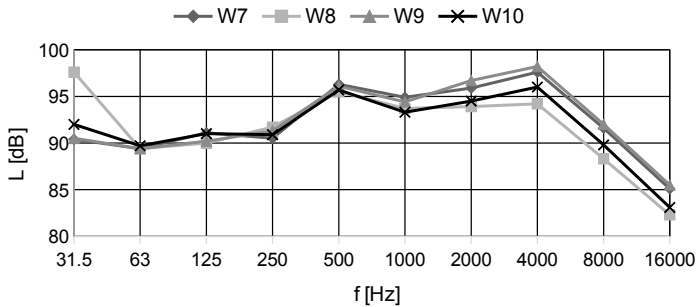
Nr widma hałasu	Poziomy ciśnienia akustycznego w dB w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych w Hz									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
W1	90,4	89,8	94,8	94,3	96,2	92,9	91,9	88,5	86,2	79,8
W2	89,7	92,6	97,3	99,9	98,1	96	95,4	92,3	89,1	84,1
W3	87,4	92,5	97	98	97	95,5	95,3	91	88,3	84
W4	89,3	91,9	95,9	100,1	98	96	95,1	91,3	88,5	82,9
W5	88,5	88,7	89,4	91,7	94,8	95,9	95,7	94,4	89	81,9
W5a	88,9	87,5	89,5	92	95,5	96,1	95,6	94,4	90,3	82,4
W6	90,2	87,9	88,9	91,1	97,5	97,7	97	96,1	90,6	83,5
W6a	89	86,8	89,8	91	101,7	97,6	98,1	97,6	93,6	87
W7	90,4	89,4	91,1	90,5	96,3	94,9	95,9	97,6	91,6	85,1
W8	97,6	89,4	90	91,7	95,5	93,7	93,9	94,2	88,3	82,3
W9	90,5	89,4	90,2	91,3	96,1	94,4	96,7	98,2	92	85,5
W10	92	89,7	91	90,9	95,7	93,3	94,5	96	89,8	83,1
W11	91,5	92,2	91,2	90,9	95	94,1	92,4	91,6	84,3	76,5
W12	90,5	90,7	89,1	85,2	87,4	86,4	86,2	85	78,4	70,5
W13	88,4	89,2	86,5	87,7	90,6	89,3	89,1	88,6	81,6	72,9
W14	90,9	90	88,1	88,8	90,1	90,1	89,8	88,9	82	75,6
W15	88,1	87,3	86	88,3	87	86,9	86	83,8	75,4	67,2
W16	99,5	104,1	103,1	92	92,4	93,3	94	98,0	106,2	95,3



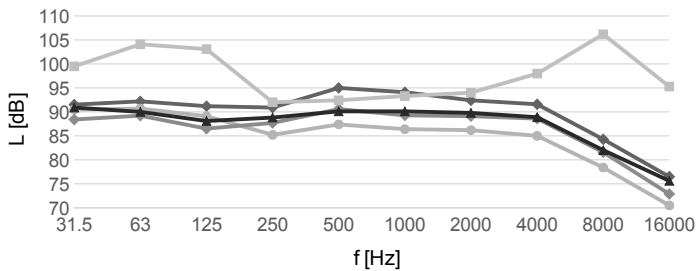
Rysunek 2. Widma hałasu na stanowiskach obsługi pras poziomych



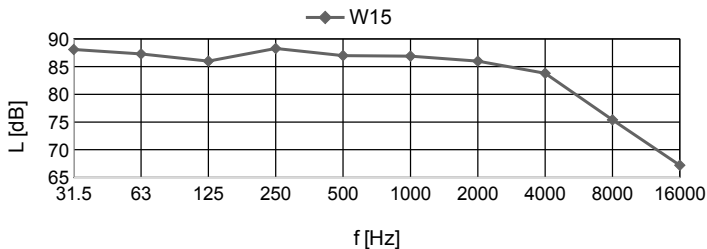
Rysunek 3. Widma hałasu na stanowiskach obsługi dekoratorów



Rysunek 4. Widma hałasu na stanowiskach obsługi natryskiwarek



Rysunek 5. Widma hałasu na stanowiskach obsługi szyjkownic



Rysunek 6. Widma hałasu na stanowisku obsługi paletyzatora

Dobór ochronników słuchu wykonano metodą pasm oktaowych zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie PN-EN 458: 2006 [19]. W trakcie doboru wykorzystano zmierzone na stanowiskach pracy widma hałasu, których wartości przedstawiono wyżej oraz wartości średniego tłumienia dźwięku i odchylenia standardowe tłumienia dźwięku przedstawione w informacji dla użytkownika ochronników słuchu. Dobór przeprowadzono uwzględniając 28 typów wkładek przeciwhałasowych oraz 36 typów naszników przeciwhałasowych.

Zgodnie z wymaganiami normy [19] poziom dźwięku A pod "dobrze" dobranym nasznikiem słuchu powinien być z zakresu 75 dB do 80 dB. Gdy poziom dźwięku A pod ochronnikiem mieści się w zakresie 70 dB do 75 dB lub od 80 dB do 85 dB to poziom ochrony jest "akceptowalny". Powyżej 85 dB ochrona słuchu pracownika jest niewystarczająca. Poniżej 70 dB zabezpieczenie jest zbyt wysokie. Zbyt duże tłumienie dźwięku może powodować u pracownika uczucie izolacji akustycznej. Tworzy to dyskomfort pracy i w efekcie może spowodować odrzucenie przez pracownika ochronnika słuchu.

Na podstawie analizy doboru ochronników słuchu i wszystkich badanych stanowiskach pracy tzn. obsługa pras poziomych, dekoratorów, natryskiwarek, szyjkownic i paletyzatora stwierdzono że:

- brak naszników przeciwhałasowych z zakresu „dobre” oceny zabezpieczenia,
- brak wkładek z zakresu „dobre” oceny zabezpieczenia,

- znaleziono 9 wzorów naszników przeciwhałasowych, które znajdują się w zakresie „akceptowalne”: JSP Supamuff, EHNA 3001 Star, UVEX dBEX 2300+, JSP J Muff, Peltor H6A, 3M 1435, EHNA 3003 SHOT, UVEX dBex 2500+, Bilsom Clarity 1,
- znaleziono 5 wzorów wkładek przeciwhałasowych, które znajdują się w zakresie „akceptowalne”: Howard Leight Matrix blue, Bilsom PER-FLEX 5701 (nagłowne/ pod brodą, E.A.R Reflex (za głową), STOPER ELA, E.A.R TRACERS.

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań środowiskowych na badanych stanowiskach pracy w zakładach produkujących opakowania metalowe stwierdza się, że:

- Przekroczone są wartości dopuszczalnego poziomu ekspozycji na hałas odniesionego do 8-godzinnego dnia pracy,
- maksymalne poziomy dźwięku A i szczytowe poziomy dźwięku C, zmierzone na stanowiskach pracy nie przekraczają wartości NDN hałasu.

Zagrożenie hałasem na stanowiskach pracy w badanych zakładach wynika z hałasu technologicznego, niewłaściwego rozmieszczenia stanowisk pracy oraz właściwości akustycznych pomieszczenia, w którym się one znajdują. W badanych zakładach linie produkcyjne były rozmieszczone w halach bez adaptacji akustycznej. Ściany wydzielonych pomieszczeń z hal produkcyjnych, w których znajdowały się stanowiska do pracy biurowej lub koncepcyjnej, nie posiadały wystarczającej izolacji w wyniku czego występuje przenikanie hałasu technologicznego (szczególnie niskoczęstotliwościowego). Na niektórych wydziałach lakierni i w niektórych obszarach pras występuje łączne oddziaływanie hałasu i substancji chemicznych co może przyspieszyć pogorszenie ubytku słuchu ze względu na synergiczne oddziaływanie tych czynników szkodliwych

Szkodliwe działanie hałasu na stanowiskach pracy może być ograniczone przez podejmowanie odpowiednich działań profilaktycznych [10,11]. Najlepsze rezultaty przynosi eliminacja zagrożenia hałasem przez jego redukcję u źródła powstawania poprzez działania w zakresie ograniczenia emisji hałasu przez urządzenia, będące źródłem tego czynnika. Wybierając maszyny należy zwrócić uwagę na podawany przez producenta deklarowany poziom hałasu urządzenia. Przenośniki i wały istniejących maszyn należy pokryć dźwiękochłonną warstwą gumy lub tworzywa. Pneumatyczne zawory lub cylindry powinny być wyposażone w tłumiki. Poza tym należy ograniczać hałas powodowany przez dysze powietrzne. Jeżeli to tylko możliwe, sprężarki należy umieszczać poza obszarem pracy lub też osłaniać je obudową. W liniach transportowych należy zainstalować boczne osłony np. z plexi wyłożone od wewnątrz materiałem o wysokim współczynniku izolacji akustycznej lub istniejące osłony z blachy wyłożyć ww. materiałem. Zredukowanie impulsów hałasu uderzeniowego przemieszczających się elementów na taśmie można uzyskać poprzez zmniejszenie prędkości linii i zwiększenie odległości między produktami na taśmie.

Oprócz działań o charakterze technicznym powinny być prowadzone równoległe działania o charakterze organizacyjnym. W tym zakresie miejsca pracy i stanowiska pracy powinny być rozmieszczone w sposób zapewniający izolację od źródła hałasu i ograniczać jednocześnie oddziaływanie innych źródeł hałasu na pracownika. W odniesieniu do badanych stanowisk pracy

znajdujących się w zakładach opakowań należy zwiększyć odległość między stanowiskami. Prace wywołujące hałas i prace nie powodujące hałasu należy rozdzielać przez ulokowanie ich w oddzielnych pomieszczeniach lub wydzielenie za pomocą ekranów (np. stanowiska odbioru wyrobów gotowych). Środki pracy, urządzenia, układy izolująco-tłumiące oraz inne środki ochrony zbiorowej powinny być systematycznie konserwowane. W odniesieniu do pomieszczeń należy wykonać odpowiednio dobraną adaptację akustyczną pomieszczeń (np. sufity i ściany pokryć materiałami dźwiękochłonnymi). Należy uwzględnić występowanie innych, oprócz hałasu, czynników szkodliwych (np. w obszarach występowania substancji chemicznych oprócz ograniczenia hałasu należy zastosować odpowiednio skuteczną wentylację).

Pracownicy powinni odbywać szkolenia w zakresie poprawnej i bezpiecznej obsługi maszyn i urządzeń. Powinni być informowani o zagrożeniu hałasem i skutkach dla zdrowia i bezpieczeństwa pracy. Ponadto zatrudnieni powinni odbywać w ramach profilaktyki medycznej wstępne i okresowe badania lekarskie. Badania te mają na celu odsunięcie od prac w narażeniu na hałas osób, których stan zdrowia odbiega od normy, gdyż w wyniku narażenia na hałas może on ulec dalszemu pogorszeniu. Badania te mają również na celu określenie wczesnych objawów zmian chorobowych (uszkodzenia słuchu) powstających pod wpływem narażenia na hałas i niedopuszczenie do pogłębiania się choroby.

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mhamdi A., Ben Amor A., Amri A., Youssef I., Landhari N., Gharbi R. 2012. “Ergonomic evaluation of a situation of co-exposure to solvents and noise in a printing of flexible packing”. *Work* 41: 496-502.
- [2] Standler Krystian, Kowal Maria. 2013. „Problematyka bezpieczeństwa pracy w zakładach papierniczych”. *Przegląd Papierniczy* 69 (9) : 489-492
- [3] Szewczyk Włodzimierz., Łapczyńska Monika. 2013. „Bezpieczeństwo i higiena pracy w przemyśle papierniczym.” *Przegląd Papierniczy* 69 (7) : 330-332.
- [4] Smagowska B., Pleban D. Zagrożenie hałasem na wybranych stanowiskach pracy w zakładzie produkcji tektury falistej i opakowań tekturowych. *Przegląd papierniczy* 10(2017) 703 - 708
- [5] Zużewicz Krystyna, Konarska Maria. 2008. “Praca zmianowa a wiek”, CIOP-PIB Warszawa
- [6] Zgierska A. Pracujący w gospodarce narodowej w 2016r. GUS W-wa 2017 <http://stat.gov.pl/gus/pracaludnoscPLKHTML.htm>
- [7] Zgierska A. Warunki pracy w 2016r wyd. GUS, W-wa 2017 <http://stat.gov.pl/en/publikacje>
- [8] Wasiak W. Przemysł i rynek opakowań w Polsce – RAPORT PIO, *OoH magazine*, 4-6 (2015) 40-41, <http://www.oohmagazine.pl>
- [9] Rynek opakowań w Polsce, Departament Informacji Gospodarczej, Polska Agencja Informacji i Inwestycji Zagranicznych S.A. Warszawa 2011.
- [10] Koradecka D. [red.] *Bezpieczeństwo i higiena pracy*. CIOP-PIB, Warszawa 2008

- [11] Zawieska WM. [red] *Ryzyko zawodowe. Metodyczne podstawy oceny*. CIOP-PIB, W-wa 2007
- [12] PN-N-18002: 2011. Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.
- [13] Rozporządzenie ministra gospodarki i pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (Dz. U. Nr 157, poz. 1318).
- [14] Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. 2014, poz. 817, z późn. zm.)
- [15] PN-EN ISO 9612 Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna
- [16] PN-N-01307:1994 Hałas. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.
- [17] PN-N-01338: 2010 Akustyka. Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- [18] Radosz J. Procedura pomiaru hałasu ultradźwiękowego. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy (PIMOS)*, 4(86) (2015), 169–190.
- [19] PN-EN 458:2006 Ochronniki słuchu – zalecenia dotyczące doboru, użytkowania, konserwacji codziennej i okresowej – dokument przewodni. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2006
- [20] Kozłowski E.: *Metoda badania narażenia na hałas osób stosujących nauszniki przeciwhałasowe*. „Bezpieczeństwo Pracy - nauka i praktyka”, nr 5, 2006

Krzysztof SZEMELA, Wojciech ŻYŁKA, Wojciech RDZANEK
**PROMIENIOWANIE DŹWIĘKU TŁOKA KOŁOWEGO UMIESZCZONEGO
NA DNIE OTWARTEJ PROSTOKĄTNEJ WNEKI – WSTĘPNE WYNIKI
DOŚWIADCZALNE**

*Uniwersytet Rzeszowski,
Katedra Mechatroniki i Automatyki
e-mail: alpha@ur.edu.pl*

Streszczenie: Otwarte wnęki o różnych przekrojach bardzo często stanowią elementy konstrukcyjne, maszyn, urządzeń jak również pojazdów. Można je również spotkać w budownictwie jako wyloty kanałów wentylacyjnych lub innych urządzeń. Z tego względu istotne jest zbadanie właściwości akustycznych wnęk. Celem badań było doświadczalne określenie promieniowania dźwięku przez otwartą prostokątną wnękę o sztywnych ścianach, której wylot był umieszczony w płaskiej odgradzie. Źródłem dźwięku był kołowy tłok umieszczony na dnie. Wnękę oraz płaską odgradę zbudowano z płyty wiórowej. Tłok kołowy został wykonany ze stali co zapewniło mu dużą sztywność podczas drgań. Stanowisko pomiarowe umieszczono w komorze semi-bezechowej, co ograniczyło wpływ fal odbitych jak również zakłóceń zewnętrznych. Drgania tłoka były generowane za pomocą wzbudnika. Sygnałem wymuszającym był sygnał świergotowy zmieniający się w granicach od 100 Hz do 1500 Hz. Pozwoliło to określić odpowiedź układu w całym analizowanym zakresie częstotliwości. Zmierzone bezdotykowo zmiany prędkości drgań tłoka w czasie za pomocą wibrometru laserowego. W wybranych punktach pola znajdujących się na zewnątrz wnęki mierzono zmiany w czasie ciśnienia akustycznego. Czas trwania pomiaru w każdym punkcie wynosił 35 s, a częstotliwość próbkowania była równa 12.8 kHz. Na podstawie danych pomiarowych oraz wykorzystując dyskretną transformatę Fouriera otrzymano amplitudę ciśnienia dźwięku jak również odpowiadającą jej amplitudę prędkości drgań tłoka jako dyskretną funkcję częstotliwości. Określono rozkłady znormalizowanego modułu ciśnienia akustycznego dla wybranych częstotliwości i położeń tłoka. Do normalizacji ciśnienia akustycznego wykorzystano napięcie sygnału sterującego ruchem tłoka oraz prędkość drgań źródła. Zbadano zależność modułu znormalizowanego ciśnienia dźwięku od częstotliwości dla wybranego punktu pola.

WPROWADZENIE

W wielu praktycznych zastosowaniach wnęki o różnych kształtach stanowią elementy urządzeń, maszyn jak również przetworników elektroakustycznych. Otwarte struktury umieszczone w płaskich ekranach są elementami wielu obiektów architektonicznych. Ponadto, wnęki jako otwarte falowody występują w zurbanizowanym środowisku jako wyloty różnych systemów wentylacyjnych, klimatyzacyjnych lub chłodzących. Dlatego bardzo ważne jest określenie w wyniku teoretycznych jak również doświadczalnych badań wibroakustycznych właściwości otwartych struktur.

Różne metody zostały wykorzystane aby teoretycznie zbadać promieniowanie otwartych falowodów w polu dalekim [1,2]. Promieniowanie dźwięku przez wylot cylindrycznego falowodu zostało teoretycznie określone dla wymuszenia wieloma modami [3]. Właściwości akustyczne otwartego kanionu przy zadanym rozkładzie ciśnienia dźwięku na jego wlocie zostały określone z wykorzystaniem analizy modalnej [4]. Przeprowadzono numeryczne symulacje pozwalające określić zachowania akustyczne kanionów [5,6]. Metody analityczne

wykorzystano by zbadać rezonanse w otwartych wnękach [7,8]. Promieniowanie otwartej prostokątnej wnęki umieszczonej w płaskiej odgradzie zostało teoretycznie zbadane wykorzystując analizę modalną i warunki ciągłości na granicy obszaru wnęki – półprzestrzeń [9]. Analizę przeprowadzono przyjmując, że źródłem dźwięku jest kołowy tłok umieszczony na dnie wnęki.

Mimo dużej liczby teoretycznych prac poświęconych promieniowaniu otwartych struktur wibroakustycznych brakuje wyników doświadczalnych, które mogłyby posłużyć do weryfikacji teoretycznych rozwiązań. Dlatego głównym celem przeprowadzonych badań jest określenie na drodze doświadczalnej właściwości akustycznych obiektu, którego promieniowanie zostało teoretycznie określone w pracy [9]. W przyszłości otrzymane wyniki pomiarowe mogą zostać porównane z otrzymanymi wynikami analiz wykonanych w oparciu o przedstawione wzory teoretyczne.

STANOWISKO I PRZYRZĄDY POMIAROWE

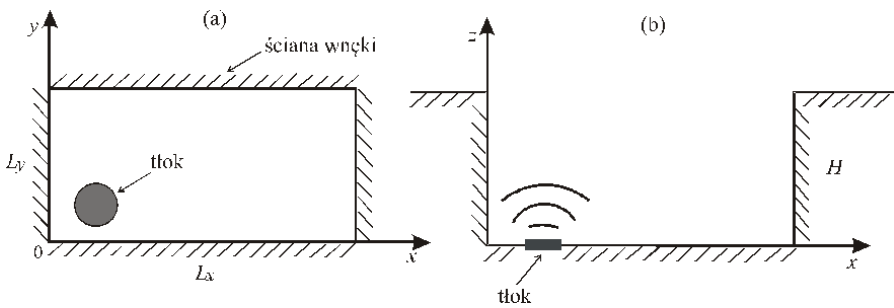
Badanym obiektem wibroakustycznym była otwarta prostokątna wnęka, której wylot został umieszczony w płaskiej odgradzie (Rys. 1). Wnęka i odgroda zostały wykonane z płyty wiórowej o grubości 28 mm. Szerokość i długość odgrody były równe 1.7 m, co pozwoliło przyjąć, że dla fal o wyższych częstotliwościach, gdy długość fal akustycznych $\lambda \ll 1.7$ m, odgroda może być uważana za nieskończoną.

Położenia punktów pola zostało określone w kartezjańskim układzie współrzędnych (rys. 2). Źródłem dźwięku był stalowy kołowy tłok o promieniu 20 mm, który został umieszczony na dnie wnęki. Badania przeprowadzono dla wnęki o długości $L_x = 0.2$ m, szerokości $L_y = 0.12$ m oraz głębokości $H = 0.1$ m. Wnęka miała wymienne dno, dzięki czemu można było zmieniać położenie źródła tłokowego. Pomiary wykonano dla dwóch położenia centralnego punktu źródła: I – $(L_x/2, L_y/2)$ oraz II – $(L_x/4, L_y/2)$. Całe stanowisko pomiarowe umieszczono na czterech kolumnach wypełnionych piaskiem, co zapewniło wibroakustyczną izolację badanego obiektu od drgań budynku.

Aby ograniczyć wpływ fal odbitych jak również innych akustycznych zakłóceń, stanowisko pomiarowe umieszczone we wnętrzu komory semi-bezechowej. Wzbudnik The Modal Shop 2075E został wykorzystany do generowania drgań tłoka. Jako sygnał sterujący wybrano sygnał ściągający zmieniający się w granicach od 100 Hz do 1500 Hz. Pozwoliło to wykorzystując DFT (Discrete Fourier Transform) analizować promieniowanie dźwięku w całym badanym paśmie częstotliwości. Pomiary ciśnienia dźwięku wykonano za pomocą mikrofonu G.R.A.S. 46AE. Dodatkowo prędkość drgań tłoka została mierzona bezkontaktowo za pomocą wibrometru laserowego Polytec PDV-100. Prędkość drgań tłoka i sygnał sterujący pracą wzbudnika zostały wykorzystane jako wielkości normalizujące ciśnienie akustyczne. Pomiary wykonano z częstotliwością próbkowania 12.8 kHz, i czasem uśredniania 35 s. Do agregacji i przetwarzania danych wykorzystano moduł LMS SCADAS Mobile oraz oprogramowania LMS Test.Xpress.



Rysunek 1. Badany obiekt wibroakustyczny: prostokątna otwarta wnęka z kołowym tłokiem umieszczonym na jej dnie



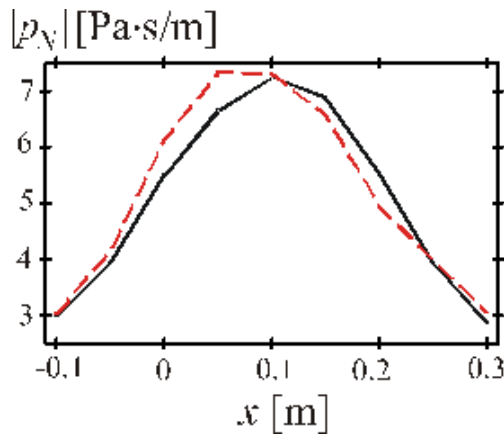
Rysunek 2. Badana prostokątna otwarta wnęka wraz z przyjętym kartezjańskim układem współrzędnych

POMIARY I ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Prędkość drgań tłoka została mierzona przed każdą serią pomiarową wykonaną w celu określenia rozkładu ciśnienia dźwięku. Rejestrowany został przebieg czasowy prędkości drgań tłoka $v(t)$ oraz napięcie sygnału sterującego jego ruchem $U_v(t)$. Następnie, w każdym punkcie pola wykonywano pomiary ciśnienia dźwięku rejestrując jego przebieg czasowy $p(t)$ jak również i przebieg czasowy sygnału sterującego drganiami źródła $U_p(t)$. Sygnały napięciowe były traktowane jako sygnały referencyjne, co pozwoliło uniezależnić wyniki pomiarów od ich chwilowych wartości. Zastosowano dyskretną transformatę Fourier'a dla wszystkich przebiegów czasowych i otrzymano następujące funkcję częstotliwości f : $v(f)$, $U_v(f)$, $p(f)$ oraz $U_p(f)$ odpowiadające wielkościom których przebiegi czasowe rejestrowano. Analizę przeprowadzono dla znormalizowanego ciśnienia akustycznego zdefiniowanego następująco

$$p_N(f) = \frac{p(f)U_v(f)}{v(f)U_p(f)}. \quad (1)$$

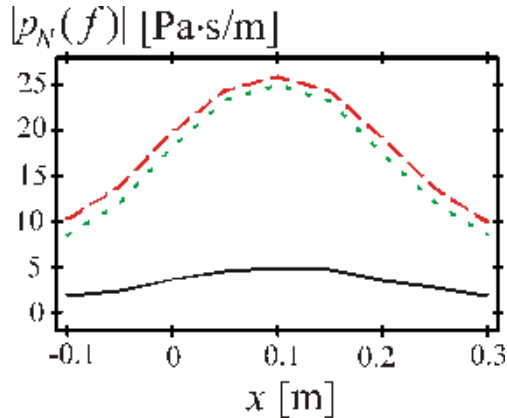
Powyższa wielkość wyrażona w [Pa s/m] jest niezależna od chwilowych wartości sygnałów sterujących jak również od prędkości drgań tłoka. Analizę promieniowania dźwięku przeprowadzono dla punktów pola znajdujących się na zewnątrz wnęki. Moduł znormalizowanego ciśnienia dźwięku $|p_N|$ jako funkcję współrzędnej x przedstawiono dla wybranych częstotliwości drgań na Rys. 3 i 4. Wpływ położenia źródła na rozkład wielkości $|p_N|$ przedstawia Rys. 3. Niesymetryczność położenia tłoka względem ścian wnęki powoduje brak symetrii pola akustycznego. Moduł znormalizowanego ciśnienia przyjmuje podobne wartości dla obu analizowanych położen źródła.



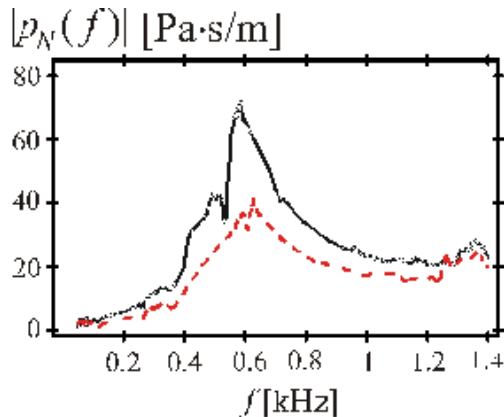
Rysunek 3. Rozkład znormalizowanego modułu ciśnienia akustycznego $|p_N|$ wzdłuż osi x kartezjańskiego układu współrzędnych dla $y = L_y/2$, $z = H = 0.05$ m oraz $f = 300$ Hz. Oznaczenia linii: ciągła – położenie tłoka I, przerywana – położenie tłoka II

Rys. 4 pokazuje istotną zależność wielkości $|p_N|$ od częstotliwości drgań tłoka. Ciśnienie dźwięku generowane dla częstotliwości 250 Hz w punkcie znajdującym się nad środkiem wnęki jest około pięć razy mniejsze niż ciśnienia rejestrowane dla wyższych częstotliwości

500 Hz i 750 Hz. Znormalizowane ciśnienie dźwięku jako funkcja częstotliwości zostało przedstawione na Rys. 5 dla wybranego punktu pola. Duża wartość $|p_N|$ pojawia się dla częstotliwości równej około 0.6 kHz, co ma miejsce dla różnych położeń tłoka. Widoczne maksimum modułu znormalizowanego ciśnienia dźwięku pojawia się również dla częstotliwości bliskiej 1.4 kHz. Wiedza dotycząca częstotliwościowej odpowiedzi obiektu może zostać wykorzystana przy projektowaniu rezonatorów akustycznych lub być pomocna w redukcji hałasu generowanego przez badany układ.



Rysunek 4. Rozkład znormalizowanego modułu ciśnienia akustycznego $|p_N|$ wzdłuż osi x kartezjańskiego układu współrzędnych dla $y = L_y/2$, $z-H=0.05$ m oraz położenia tłoka I. Oznaczenia linii: ciągła $-f = 250$ Hz, przerywana $-f = 500$ Hz, kropkowana $-f = 750$ Hz



Rysunek 5. Rozkład znormalizowanego modułu ciśnienia akustycznego $|p_N|$ jako funkcja częstotliwości drgań f dla $x = 0$, $y = 0$, $z-H=0.06$ m. Oznaczenia linii: ciągła – położenie tłoka I, przerywana – położenie tłoka II

WNIOSKI

Przeprowadzono wstępne pomiary pozwalające przetestować zbudowane stanowisko jak również określić niektóre właściwości badanego obiektu wibroakustycznego. Analizę przeprowadzono dla modułu znormalizowanego ciśnienia dźwięku. Do normalizacji ciśnienia użyto napięcia sterującego pracą wzбудnika oraz prędkości drgań tłoka. Biorąc pod uwagę, że rozważana wielkość jest niezależna od chwilowych wartości sygnału sterującego jak i prędkości drgań źródła jest ona wygodna do określenia właściwości akustycznych obiektu. Wyniki pomiarów pokazały istotny wpływ częstotliwości na wielkość modułu znormalizowanego ciśnienia. Zauważono silną odpowiedź badanej wnęki dla częstotliwości 0.6 kHz jak również 1.4 kHz. Spostrzeżenia te są istotne przy analizie właściwości obiektu jako rezonatora akustycznego.

Wykonane badania będą kontynuowane w kierunku porównania ich wyników z teoretycznymi wynikami przedstawionymi w literaturze.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. McAlpine, A. P. Daymond-King, A. J. Kempton, *Sound radiation from a flanged inclined duct*, The Journal of the Acoustical Society of America, **132**, 3637–3646 (2012).
- [2] L. M. B. C. Campos, J. M. G. S. Oliveira, *On sound radiation from an open-ended non-uniformly lined cylindrical nozzle*, Acta Acustica united with Acustica, **100**, 795–809 (2014).
- [3] A. Snakowska, J. Jurkiewicz, *Efficiency of energy radiation from an unflanged cylindrical duct in case of multimode excitation*, Acta Acustica united with Acustica, **96**, 416–424 (2010).
- [4] A. Pelat, S. Félix, V. Pagneux, *On the use of leaky modes in open waveguides for the sound propagation modeling in street canyons*, The Journal of the Acoustical Society of America, **126**, 2864–2872 (2009).
- [5] P. J. Lee, J. Kang, *Effect of height-to-width ratio on the sound propagation in urban streets*, Acta Acustica united with Acustica, **101**, 73–87 (2015).
- [6] O. Richoux, C. Ayrault, A. Pelat, S. Félix, B. Lihoreau, *Effect of the open roof on low frequency acoustic propagation in street canyons*, Applied Acoustics, **71**, 731–738 (2010).
- [7] L. M. González, P. Cobo, V. Theofilis, E. Valero, *Acoustic resonances in 2D open cavities*, Acta Acustica united with Acustica, **99**, 572–581 (2013).
- [8] S. Ortiz, L. M. González, C. González Díaz, U. P. Svensson, P. Cobo, *Acoustic resonances in a 3D open cavity with non-parallel walls*, Journal of Sound and Vibration, **363**, 181–198 (2016).
- [9] K. Szemela, *The sound radiation from a surface source located at the bottom of an open rectangular cavity*, Acta Acustica united with Acustica, **103**, 189–199 (2017).

ISBN: 978-83-61402-39-8