

**Andrzej BŁAŻEJEWSKI**

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ  
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

## Redukcja hałasu w pomieszczeniu z zaburzeniem wibroakustycznym poprzez optymalny rozkład materiału dźwiękochłonnego

Dr inż. Andrzej BŁAŻEJEWSKI

Asystent w Zakładzie Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Instytutu Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej, Politechniki Koszalińskiej. Zajmuje się zagadnieniami akustyki pomieszczeń zamkniętych, wibroakustyką oraz drganiami mechanicznymi. W 2010r doktorat nt.: Analiza obszaru zamkniętego z zaburzeniem wibroakustycznym w zakresie niskich częstotliwości.



e-mail: andrzej.blazejewski@tu.koszalin.pl

### Streszczenie

Praca dotyczy zagadnienia rozmieszczenia porowatego materiału absorbującego o zespolonej impedancji akustycznej na brzegach obszaru (pomieszczenia), w którym umieszczone zostało harmoniczne źródło wibroakustyczne. Uproszczony model rozkładu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu uzyskano stosując analizę modalną. Do rozwiązania problemu optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny. Połączenie uproszonego modelu oraz algorytmu genetycznego, pozwala na znacznie szybsze i mniej kosztowne obliczeniowo, uzyskiwanie wyników optymalizacji, w postaci rozkładu materiału absorpcyjnego w pomieszczeniu.

**Słowa kluczowe:** akustyka, amplitudy modalne, optymalizacja, algorytmy genetyczne, zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych.

### Noise reduction in a room with vibroacoustic disturbance by the optimal absorptive material distribution

#### Abstract

In the paper a problem how to properly influence an acoustic field in the enclosure with a Vibro-acoustical source [1] inside is considered. Particularly, optimization of the configuration of an acoustic absorber, i.e. porous material characterized by a complex impedance on the boundary, is presented [2]. The combination of the modal approach to modeling of the room acoustic field and the artificial intelligence methods to the optimization is a new attitude to the problem. In order to describe the acoustic pressure distribution inside the enclosure, the modal analysis with modal coupling was applied and presented in Section 2. In this case the acoustic pressure distribution in the room is a sum over a set of the room eigenfunctions and proper time components i.e. modal amplitudes [2, 3]. The formulae describing these amplitudes were obtained and eventually introduced into the multi-objective function definition [2, 4] in Section 3. The acoustic impedances on the room boundaries correlated with the material thickness were selected as design variables. In order to solve the optimization problem defined in Section 3 directly, a genetic algorithm was applied. The non-dominated solutions were searched in the process [2, 4, 5, 6]. The main ingredients of the algorithm and its settings are described in Section 4. In Section 5 the example object (room) is specified and shown in detail in Tab. 1. Applying a specific acoustic absorber on the boundary [2, 7], the room with the harmonic source was modified according to the optimization method. As the result, the set of the Pareto-optimal solutions was obtained (see Fig. 1). One solution of the Pareto set was selected and corresponding, particular boundaries covering with the acoustic absorber are shown in Fig. 2. Last, the model accuracy and the optimization results, i.e. noise reduction, are presented in Figs. 3a and 3b. The result verification was performed by comparison with the acoustic measurements (see Figs. 3c and 3d).

**Keywords:** acoustics, modal amplitudes, optimization, genetic algorithms, Pareto-optimal set.

## 1. Wprowadzenie

Redukcja niepożądanego poziomu ciśnienia akustycznego wewnątrz pomieszczenia, generowanego przez umieszczone w nim źródło dźwięku [1] jest problemem związanym z ochroną człowieka przed drganiami i hałasem. Redukcję hałasu uzyskano poprzez odpowiednie rozmieszczenie na powierzchniach wewnętrznych specjalnego materiału dźwiękochłonnego, o dobrych właściwościach absorpcyjnych przy niskich częstotliwościach. Ze względu na znaczną cenę tego typu materiałów ważne jest oszczędne stosowanie materiału z jednoczesną maksymalną redukcją hałasu. Przeciwności obu kryteriów wymaga stosowania odpowiednich metod optymalizacji. Jednocześnie zastosowanie modelu pola akustycznego przydatnego w rozwiązywaniu tego typu problemów jest szczególnie ważne. Założenia modelu matematycznego i metody optymalizacji zaprezentowano szczegółowo w pracy [2].

## 2. Opis pola akustycznego w obszarze zamkniętym

Jeżeli w pewnym pomieszczeniu umieszczone zostanie urządzenie, maszyna lub inny obiekt drgający (źródło wibroakustyczne) [1] można uważać, że jest to obszar przestrzeni  $V$  ograniczony powierzchniami  $S$  o określonych warunkach brzegowych, ze źródłem opisanym przez funkcję  $f$  usytuowanym w określonym punkcie tego obszaru. Pole akustyczne wewnątrz przedstawia niejednorodne równanie falowe:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = f \quad (1)$$

gdzie:  $p=p(r,t)$  to ciśnienie akustyczne w punktach  $r(x,y,z)$  rozpatrywanego obszaru i określonym czasie  $t$ ,  $c$  prędkość propagacji fali akustycznej w powietrzu,  $f$  funkcja definiująca źródło dźwięku w jego położeniu, a symbol  $\Delta$  to operator Laplace'a. Wewnątrz obszaru na powierzchni  $S$  istnieją znane warunki brzegowe w postaci:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{Z} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

gdzie:  $Z$  to impedancja akustyczna powierzchniowa,  $\partial p/\partial n$  to gradient ciśnienia akustycznego w kierunku prostopadłym do powierzchni brzegowych, a  $\rho_0$  gęstość powietrza. Jeżeli obszar ten uznać, za układ rezonansowy o charakterystycznych modach akustycznych i skorelowanych z nimi częstotliwościami własnymi, to zgodnie z założeniami analizy modalnej rozwiązanie równania falowego (1) można przedstawić w postaci [2, 3]:

$$p(r,t) = \sqrt{V} \sum_{m=0}^{\infty} T_m(t) \Psi_m(r) \quad (3)$$

gdzie:  $\Psi_n(r)$  to funkcje własne obszaru, a  $T_n(t)$  pewne funkcje, komponenty czasowe. Funkcje własne  $\Psi_n(r)$ , przy zerowych warunkach brzegowych Neumanna  $\partial \Psi_n/\partial n=0$  spełniają równanie Helmholtz'a w postaci:

$$\Delta \Psi_n(r) + \lambda_n \Psi_n(r) = 0 \quad (4)$$

gdzie:  $\lambda_n$  to wartości własne skorelowane z częstotliwościami własnymi  $\omega_n$  poprzez zależność  $\lambda_n=(\omega_n/c)^2$ . Zgodnie z teorią Greena,

obie funkcje spełniające równania (1) oraz (4), w obszarze zamkniętym  $V$  dodatnio zorientowanym powinny spełniać równanie:

$$\int_V (p \Delta \Psi_n - \Psi_n \Delta p) dV = \int_S \left( p \frac{\partial \Psi_n}{\partial n} - \Psi_n \frac{\partial p}{\partial n} \right) dS \quad (5)$$

Implementując po lewej stronie zależności (5) laplasjany z odpowiednio przekształconych równań (1) oraz (4), a po prawej stronie zależności na warunki brzegowe przy tych równaniach, następnie wprowadzając zależność na ciśnienie akustyczne (3) i wykorzystując założenie o ortogonalnych funkcjach własnych, w rezultacie otrzymujemy układ równań różniczkowych w postaci [2, 3]:

$$\ddot{T}_n + \omega_n^2 T_n + \rho_0 c^2 \sum_{m=0}^{\infty} \dot{T}_m \int_S \frac{\Psi_m \Psi_n}{Z} dS = \frac{c^2}{\sqrt{V}} \int_V f \Psi_n dV, \quad (6)$$

Jeżeli źródło dźwięku ma charakter harmoniczny  $f = f_0 e^{j\omega t}$ , to  $f_0 = j\omega \rho_0 Q$  przy wydatku  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] lub  $f_0 = 2\sqrt{\rho_0 \pi c P}$  przy mocy  $P$  [W] źródła. Wtedy składowe czasowe w równaniu (6) można również założyć w postaci harmonicznej tj.  $T_n = A_n e^{j\omega t}$ , gdzie  $A_n$  nazywano amplitudami modalnymi. Dalsze założenie o punkowym źródle usytuowanym w  $r_0(x_0, y_0, z_0)$  powoduje, że wyrażenie (6) można zapisać w postaci równania algebraicznego, z którego można wyznaczyć wartości amplitud modalnych w postaci [2, 3]:

$$A_n = \frac{\frac{c^2}{\sqrt{V}} f_0 \Psi_{n0} - 2j\omega \sigma_{mn} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \int_S \frac{\Psi_m \Psi_n}{Z} dS}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2j\omega \int_S \frac{\Psi_n^2}{Z} dS} \quad (7)$$

gdzie:  $\sigma_{mn} = 1$  dla  $m \neq n$  oraz  $\sigma_{nn} = 0$  dla  $n = m$ ,  $\Psi_{n0} = \Psi_n(r_0)$  oznacza wartość funkcji własnej w punkcie usytuowania źródła. Całki w zależności (7) reprezentują tłumienie w układzie akustycznym związany z impedancyjnymi warunkami brzegowymi. Wartości amplitud  $A_m$  można wyznaczyć metodą iteracyjną. W pierwszej kolejności uzyskuje się wartości amplitud, gdy współczynniki sprzężenia między modami tj. całki w liczniku (7) równe są zero. Wartości amplitud dla tzw. układu rozprężonego modów stosuje się jako pierwsze rozwiązanie w sumie w zależności (7). Znając  $\Psi_n$ ,  $\omega_n$  oraz  $A_n$  można określić rozkład pola akustycznego w obszarze zamkniętym  $V$  z zależności (3), a następnie do oceny właściwości pola akustycznego, a więc i poziomu hałasu wewnątrz pomieszczenia, można zastosować wartość średniokwadratową ciśnienia akustycznego  $p_{rms}$ , odniesioną do całej jego objętości w postaci [2, 3]:

$$p_{rms} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\infty} A_m^2} \quad (8)$$

W zależności (8) ponownie wykorzystano ortogonalność funkcji własnych, która umożliwiła zastąpienie całki kwadratu ciśnienia akustycznego sumą kwadratów amplitud modalnych. Analizując zależność (7), można zauważyć, że wartości amplitud ze względu na szybki wzrost czynnika  $\omega_n^2 - \omega^2$ , szybko maleją do zera przy częstotliwościach własnych  $\omega_n^2 \gg \omega^2$ . Oznacza to, że istotne stają się amplitudy w stosunkowo wąskim paśmie częstotliwości własnych, bliskich częstotliwości źródła. Można założyć, że w przypadku niskich częstotliwości wymuszeń harmonicznych istnieje skończona liczba funkcji i częstotliwości własnych, przy której można z dostateczną dokładnością stosować zależność (3) w postaci szeregu skończonego.

### 3. Sformułowanie problemu optymalizacji

Zastosowano dwa kryteria optymalizacji [2]: kryterium akustyczne określające wartości pola oraz uogólnione kryterium koszt-

tów związanych z pokryciem materiałem dźwiękochłonnym powierzchni w pomieszczeniu. Jest to przypadek optymalizacji wielokryterialnej [4], gdzie **zmiennne decyzyjne**  $Z_i$  to wartości impedancji przypisane  $i$ -tej części powierzchni  $S$  obszaru zamkniętego  $V$ . Liczba zmiennych decyzyjnych  $N$  zależy od podziału powierzchni brzegowej obszaru na elementy, na których impedancja akustyczna może przyjmować własne wartości. W przypadku pomieszczeń mogą to być ściany, sufit, podłoga, co nie wyklucza innego, dodatkowego podziału w ramach tych elementów. **Funkcja celu**  $F$  przyjmuje postać [2]:

$$F\{Z_i(d)\} = [p_{rms}, f_{koszt}]^T \quad (10)$$

gdzie:  $Z_i(d)$  to wartości zmiennych decyzyjnych zależnych od grubości materiału dźwiękochłonnego,  $p_{rms}$  wartości kryterium akustycznego, a kryterium  $f_{koszt}$  definiuje koszt - nakład, który należy ponieść, żeby osiągnąć efekt  $p_{rms}$ . Ze względu na istotę kryterium kosztów, zdefiniowano je w następujący sposób [2]:

$$f_{koszt} = \sum_i^N [Z_{max}(d=0) - Z(d)] w_i \quad (11)$$

gdzie:  $Z_{max}$  górna granica zakresu rozpatrywanych wartości impedancji, odpowiadających grubości warstwy materiału absorpcyjnego  $d=0$ ,  $N$  to liczba zmiennych decyzyjnych,  $w_i$  wagi proporcjonalne do wielkości powierzchni o impedancji  $Z_i(d)$ . Zastosowanie wag daje możliwość „wyróżniania” wybranych powierzchni poprzez ich wartości.

**Ograniczenia** przyjęto na wartości zmiennych decyzyjnych ze względu na maksymalną dopuszczalną grubość materiału. **Uproszczeniem** jest ograniczona liczba uwzględnianych funkcji własnych. **Założono** także, że częstotliwość wymuszenia mieści się w zakresie, w którym długość fali w porównaniu z wymiarami źródła pozwala uznać je za źródło punktowe, a położenie, wydatek oraz częstotliwość źródła dźwięku są stałe. Rozpatrywano stan ustalony pola akustycznego.

### 4. Metoda optymalizacji - algorytm genetyczny

Optymalizacja wielokryterialna oparta jest na poszukiwaniu tzw. rozwiązań niezdominowanych. Jednym ze sposobów bezpośredniego wyznaczania takich rozwiązań są algorytmy genetyczne [5]. Zaprogramowano je w ten sposób, że wybrana populacja potencjalnych rozwiązań sprawdzana jest pod względem tego, czy są rozwiązaniami zdominowanymi czy też nie. W rozpatrywanym przypadku optymalizacji, rozwiązanie  $Z^1 = [Z^1_1, \dots, Z^1_N]$  dominuje inne rozwiązanie  $Z^2 = [Z^2_1, \dots, Z^2_N]$  wtedy i tylko wtedy, gdy [2, 6]:

$$p_{rms}(Z^1) \leq p_{rms}(Z^2) \wedge f_{koszt}(Z^1) \leq f_{koszt}(Z^2) \quad (12)$$

oraz  $p_{rms}(Z^1) < p_{rms}(Z^2) \vee f_{koszt}(Z^1) < f_{koszt}(Z^2)$

W wybranej populacji algorytm genetyczny do selekcji i sortowania kolejnych zestawów rozwiązań niezdominowanych używa algorytmu nadawania rang [2, 6]. Po dokonaniu „rangowania” całej badanej populacji stosuje się metodę ruletki w celu losowego wyodrębnienia „rodziców”  $Z^P$  dla nowej populacji „potomków”  $Z^C$ , którą tworzą poprzez algorytmy krzyżowania i mutacji. Metoda krzyżowania zastosowana w tym przypadku optymalizacji nazywana jest krzyżowaniem wielopunktowym i odbywa się według następującej formuły:

$$Z^{C1} = S_N \cdot Z^{P1} + S_N^* \cdot Z^{P2} \quad (13)$$

$$Z^{C2} = S_N \cdot Z^{P2} + S_N^* \cdot Z^{P1}$$

gdzie:  $S_N$  jest ciągiem losowo uporządkowanych liczb 0 i 1, a  $S_N^*$  jest ciągiem, w którym liczby 0 i 1 zostały zamienione miejscami.

Długość ciągów  $S_N$  i  $S_N^*$  odpowiada liczbie zmiennych decyzyjnych  $N$ . W opisywanym przypadku optymalizacji proces mutacji został ograniczony do zamiany w nowej generacji określonej liczby osobników  $Z^c$  na osobniki losowo wygenerowane. Zamyka to jeden cykl działania algorytmu, czyli kończy jedną iterację. W algorytmie zaprogramowano wielkość badanej populacji oraz wykonanie określonej liczby iteracji. W rezultacie uzyskano rozwiązania Pareto-optymalne [2, 6].

## 5. Przykład optymalizacji obiektu rzeczywistego

Optymalizację rozkładu materiału według definicji (13) przeprowadzono w rzeczywistym pomieszczeniu standardowo przeznaczonym do przebywania ludzi, o kształcie zbliżonym do litery „L”. Objętość pomieszczenia wynosiła  $V=45,27\text{m}^3$ , a całkowita powierzchnia wewnętrzna  $S=84,96\text{m}^2$ . Wyszczególniono 15 różnych powierzchni, które odpowiadały elementom konstrukcyjnym i funkcjonalnym w pomieszczeniu. Rodzaj powierzchni skorelowany z odpowiednimi warunkami brzegowymi przedstawiono w tab.1.

Tab. 1. Rodzaj i wielkość powierzchni wewnętrznych w pomieszczeniu  
Tab. 1. Type and sizes of the surfaces in a room

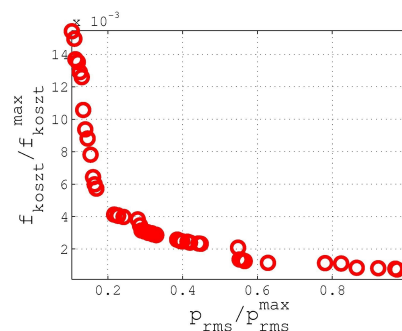
Numer powierzchni	Pole powierzchni [ $\text{m}^2$ ]	Rodzaj powierzchni w pomieszczeniu
1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15	6,10; 7,95; 15,11; 3,98; 4,98; 2,01; 0,20; 0,01; 0,20; 0,27; 6,23	ściana - tynk na cegle
3	17,10	podłoga - twarda guma
4	17,02	sufit - beton
8, 14	2,00; 1,78	drzwi - twarde drzewo

Jako materiał absorbujący wykorzystano piankę melaminową o następujących parametrach: gęstość objętościowa  $\rho = 8,21 \text{ kg/m}^3$ , oporność właściwa przepływu powietrza  $R_f = 1303,1 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$ . Zespoloną powierzchnię impedancję wyznaczano według modelu empirycznego Delany-Bazley'a [2, 7]. Model daje wyniki zbliżone do innych znanych modeli w przypadku materiałów, których oporność właściwa przepływu powietrza i rozpatrywany zakres częstotliwości spełniają warunek  $0,01 \leq \rho_0 \omega / 2\pi R_f \leq 1$ .

Optymalizację przeprowadzono w przypadku źródła usytuowanego w określonym punkcie o stałej mocy i dyskretnym widmie 300 Hz. Przy tej częstotliwości ograniczono liczbę funkcji własnych w zależnościach (3) i (8) do  $m=500$ . Założono możliwość stosowania materiału absorpcyjnego tylko o określonych grubościach warstwy  $d$  (0,03m i 0,06m). Zmodyfikowano również funkcję kosztów  $f_{\text{koszt}}$ , tak aby wykluczone było pokrycie powierzchni nr 3-podłogi pomieszczenia materiałem absorpcyjnym.

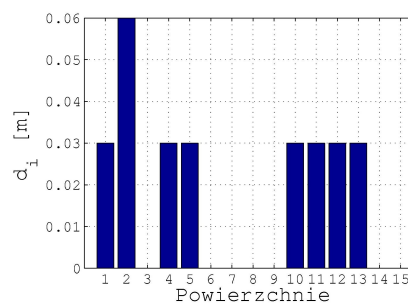
Algorytm genetyczny [6] zaprogramowano na wykonanie 50 iteracji dla populacji liczącej 100 elementów. W jednej iteracji rozpatrywano 100 możliwych rozkładów materiału absorpcyjnego o różnej grubości na 15 powierzchniach wewnętrznych pomieszczenia. Wyniki optymalizacji tj. zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych przedstawiono na rys. 1. Wartości  $p_{\text{rms}}$  znormalizowano względem ciśnienia średnio kwadratowego  $p_{\text{rms}}^{\text{max}}$  pomieszczenia niemodyfikowanego akustycznie tj. bez zastosowania materiału absorpcyjnego. Wartości  $f_{\text{koszt}}$  znormalizowano względem kosztów maksymalnych  $f_{\text{koszt}}^{\text{max}}$ , które odpowiadały kosztom pokrycia materiałem o maksymalnej grubości 0,06m wszystkich 15 powierzchni.

Na rys. 2 przedstawiono szczególny rozkład i grubości warstwy materiału na poszczególnych powierzchniach w przypadku, gdy za najistotniejsze uznano maksymalną redukcję ciśnienia akustycznego. Odpowiada to rozwiązaniu Pareto przy  $p_{\text{rms}} = \min$ . W tym przypadku uzyskano spadek średniej wartości ciśnienia akustycznego do 10%  $p_{\text{rms}}^{\text{max}}$  przy pokryciu zaledwie 55% powierzchni, przy czym tylko na jednej ze ścian zastosowana została podwójna warstwa.

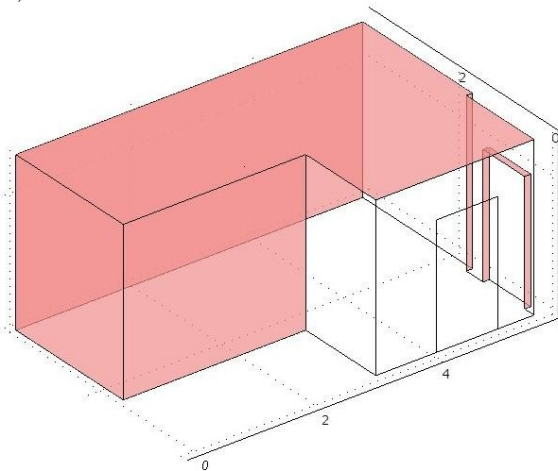


Rys. 1. Rozwiązania Pareto-optymalne  
Fig. 1. The Pareto-optimal solutions

a)



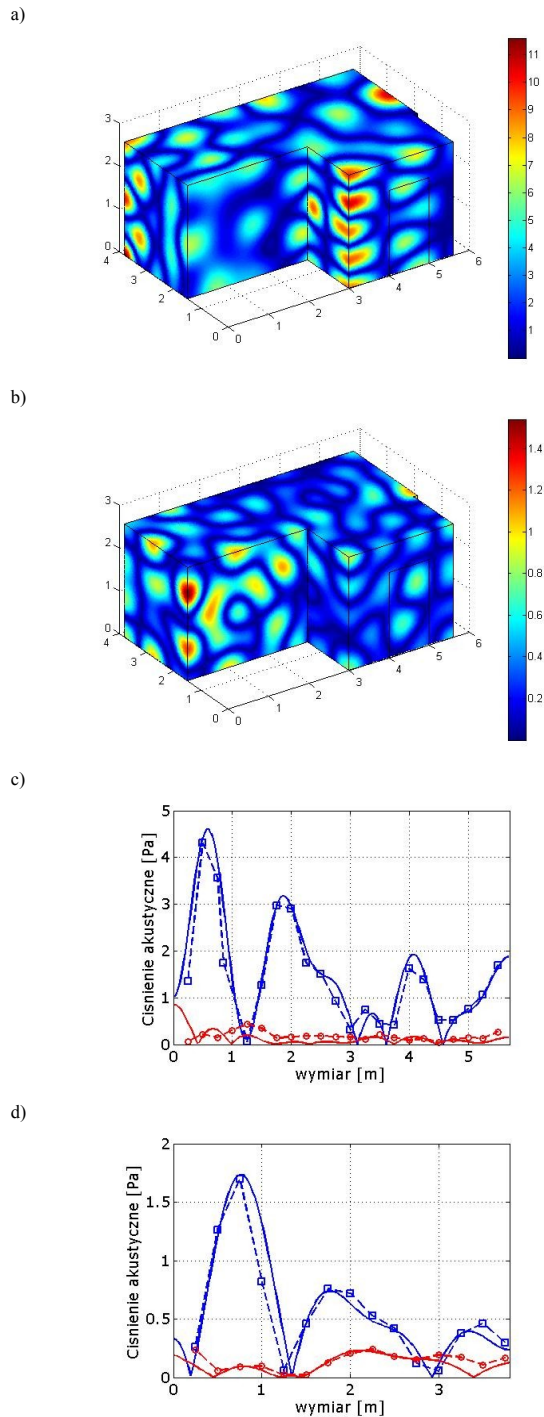
b)



Rys. 2. Grubość materiału dźwiękochłonnego  $d_i$  na poszczególnych powierzchniach (a), oraz konfiguracja w pomieszczeniu (b), w przypadku rozwiązania Pareto-optymalnego przy  $p_{\text{rms}} = \min$

Fig. 2. The thickness of the absorptive material layer  $d_i$  (a) and its distribution in the room (b), for the Pareto-optimal solution in case of  $p_{\text{rms}} = \min$

Ten szczególny przypadek rozkładu (rys. 2) zilustrowano symulując rozkład pola akustycznego przy zastosowaniu modelu modalnego (10) oraz zweryfikowano eksperymentem (rys. 3). Wyniki symulacji w pomieszczeniu niemodyfikowanym akustycznie przedstawia rys.3a oraz po optymalizacji rys. 3b. Na rys. 3c i rys. 3d przedstawiono wartości ciśnienia akustycznego w dwóch wybranych osiach pomieszczenia. Do badań użyto aparatury firmy Brüel & Kjaer: wszechkierunkowe źródło OmniSource typu 4295 spełniające normatywne warunki wszechkierunkowości dla częstotliwości poniżej 1kHz, dedykowany do źródła wzmacniacz typu 2734 z regulacją mocy wyjściowej, kasetę pomiarową typu 3560C ze zintegrowanym generatorem sygnału harmonicznego w zakresie do 20 kHz, mikrofon typu 4943 do pomiarów pola dyfuzyjnego.



Rys. 3. Rozkład ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu: a) przed optymalizacją, b) po optymalizacji właściwości akustycznych. Wartości ciśnienia akustycznego wzdłuż osi c) dłuższej, d) krótszej, pomieszczenia przy źródle o częstotliwości 300 Hz.

(—) - symulacja pomieszczenia nieoptymalizowanego;  
 (—) - symulacja pomieszczenia optymalizowanego;  
 (---) - pomiar w pomieszczeniu nieoptymalizowanym;  
 (---) - pomiar w pomieszczeniu optymalizowanym

Fig. 3. The acoustic pressure distribution in the room: a) before optimization, b) after optimization of the acoustic properties. The values of the acoustic pressure on the c) long, d) short, room axis in the case of the source with frequency of 300 Hz.

(—) - simulation results in the room before optimization;  
 (—) - simulation results in the room after optimization;  
 (---) - acoustic pressure measurements in the room before optimization;  
 (---) - acoustic pressure measurements in the room after optimization

## 6. Podsumowanie

W niniejszej pracy pokazano zasadnicze aspekty związane z kształtowaniem pola akustycznego pomieszczeń w zakresie ni-

skich częstotliwości. Pokazano, że można w pewnych warunkach, poprzez zastosowanie analizy modalnej, uzyskać uproszczony, ale jednocześnie dokładny model pola akustycznego. Może on z powodzeniem zastąpić najczęściej stosowany model oparty na obliczeniowo kosztownej metodzie elementów skończonych MES. Dostateczną dokładność modelu potwierdziły badania eksperymentalne (rys. 3c i 3d). Dzięki temu można w krótkim czasie otrzymywać wartości pola akustycznego, co jest szczególnie ważne w procesie optymalizacji, gdy funkcja celu musi być wyznaczana wielokrotnie. Dodatkowo bazując na modelu modalnym, pewne wartości pola takie jak  $p_{rms}$  można przedstawić w postaci uproszczonej (8). Jest to wartość proporcjonalna do potencjalnej energii akustycznej pola i jako kryterium oceny właściwości akustycznych pomieszczenia bardzo ważna.

Drugi aspekt to właściwy dobór metody optymalizacji. Przy rozwiązywaniu tego typu problemów, tak jak w przedstawionym przykładzie, liczba zmiennych decyzyjnych jest znaczna, a zatem i koszty obliczeniowe optymalizacji mogą być tak duże, że proces staje się nieopłacalny. Przy 15 zmiennych decyzyjnych, aby dokonać przeglądu zupełnego, kiedy każda zmienna może przyjmować tylko trzy wartości ( $d=0; 0,03; 0,06$ ), funkcja celu musi być wywoływana i obliczona  $3^{15} = 14\,348\,907$  razy. Można znacznie ograniczyć liczbę wywołań funkcji celu, a przy tym bezpośrednio rozwiązać problem optymalizacji sformułowany w niniejszej pracy. Taką możliwość daje zastosowanie algorytmu genetycznego. Zaimplementowane tu mechanizmy umożliwiają uzyskanie wyniku optymalizacji przy ograniczonej liczbie wyznaczonych wartości funkcji celu. Liczba ta wynika z założonej wielkości badanej populacji i liczby iteracji. Co równie ważne algorytm nie jest „wrażliwy” na charakter funkcji celu oraz na to, czy jest ona różniczkowalna, czy też nie. Nie ma też problemu, jeżeli występować będzie więcej jej ekstremów.

Wyniki uzyskane i zweryfikowane w pomieszczeniu rzeczywistym pokazały zasadność przeprowadzania optymalizacji. Pokazano, że można uzyskać znaczną redukcję hałasu w pomieszczeniu przy stosunkowo niskich nakładach. Możliwe jest także wykorzystanie uzyskanych wyników przy założeniu, że kryterium kosztów jest istotniejsze. Wtedy należy wybrać rozkład materiału przy niższych wartościach kryterium kosztów (rys. 1). Często wybierane jest rozwiązanie kompromisowe najbliższe tzw. punktu utopii [8]. Pokazano również, że można poprzez odpowiednią modyfikację kryterium kosztów, wpływać na uzyskiwane wyniki w zależności od wymagań technologicznych lub konstrukcyjnych pomieszczenia.

## 7. Literatura

- [1] Cempel C.: Wibroakustyka stosowana. Poznań, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN 1988.
- [2] Błażejowski A.: Optymalizacja impedancyjnych warunków brzegowych obszaru z harmonicznym zaburzeniem wibroakustycznym. LOGISTYKA Nr 6 /2011 r., str. 209-218.
- [3] Meissner M.: Computational studies of steady-state sound field and reverberant sound decay in a system of two coupled rooms. Central European Journal of Physics, 5, 3 (2007) str. 293-312.
- [4] Marler R.T., Arora J.S.: Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Struct Multidisc Optim, 26 (2004) 369-395.
- [5] Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne+struktury danych=programy ewolucyjne. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2003.
- [6] Popov A.: Genetic algorithms for optimization, Programs for Matlab, Version 1.0. \url{http://www.automatics.hit.bg} (2005).
- [7] Komatsu T.: Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. Acoust. Sci. & Tech. 29, 2 (2008) str. 121-129.
- [8] Błażejowski A. Krzyżyński T.: Multi-objektive optimization using genetic algorithm in room acoustic. LOGISTYKA Nr 6/2010 r., str. 281-289.

otrzymano / received: 09.02.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2012

artykuł recenzowany / revised paper