AKUSTYKA TEATRÓW I SAL KONCERTOWYCH JAKO NIEMATERIALNY ELEMENT DZIEDZICTWA KULTURY

1. WPROWADZENIE

Budynek Filharmonii Pomorskiej zaprojektował Stefan Klajbor. Autorem projektu akustyki wnętrz jest Witold Straszewicz. Budynek oddano do użytku w 1958 roku. Sala koncertowa Filharmonii słynie z bardzo dobrej akustyki. W sali odbywają się koncerty symfoniczne, kameralne, recitale, a także realizowane są profesjonalne nagrania muzyki.

Budynek i wnętrza wymagają remontu i modernizacji po 60 latach użytkowania. Z uwagi na wyjątkowe walory brzmieniowe sali koncertowej uznano, że konieczne będzie wykonanie badań akustycznych sali w stanie aktualnym przed rozpoczęciem prac remontowych.

W pracy przedstawiono metodykę, zakres i ważniejsze wyniki badań akustycznych sali. Celem badań było stworzenie dokumentacji akustycznej, zawierającej niezbędne dane, wytyczne i procedury, które będą chroniły obiekt przed degradacją walorów akustycznych i umożliwią odtworzenie tkanki budowlanej w procesie renowacji wnętrza i przestrzeni sąsiadujących, gwarantujące wierne odtworzenie walorów akustycznych sali koncertowej.

2. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA SALI KONCERTOWEJ

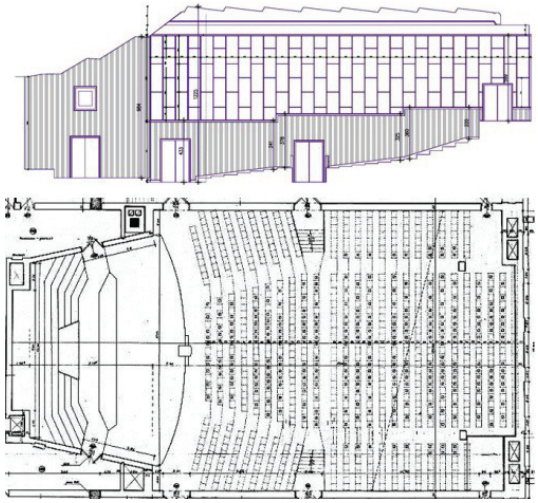
Liczba miejsc:	886,
Kubatura:	6300 m^3,
Kubatura na jedno miejsce:	7,1 m^3,
Powierzchnia:	675 m^2,
Powierzchnia estrady:	163 m^2,
Długość:	35,5 m,
Szerokość:	20,7 m,
Wysokość max:	11,9 m.

(rys. 1)

Sala koncertowa mieści się na pierwszym piętrze budynku Filharmonii Pomorskiej. Pod salą koncertową znajduje się sala kameralna.

Sala koncertowa ma kształt zbliżony do prostopadłościanu. Podłoga łagodnie wznosi się o około 4 m przy oddalaniu od estrady, licząc od pierwszego do ostatniego rzędu siedzisk. Sufit nad estradą usytuowany jest na wysokości od 7 do 11 m nad podłogą estrady i pełni funkcję reflektora akustycznego, który kieruje odbicia dźwięku instrumentów orkiestrowych w stronę widowni. Część odbić dźwięku od

Tadeusz Fidecki, Ewa Więckowska-Kosmala, OISTAT, Warszawa
Maciej Łukaszewicz, Manufaktura Technologiczna Sp. z o.o., Piaseczno



Rys. 1. Przekrój i rzut sali koncertowej im. Artura Rubinsteina w Filharmonii Pomorskiej

Fig. 1. Cross-section and plan of the Artur Rubinstein Concert Hall at the Pomeranian Philharmonic

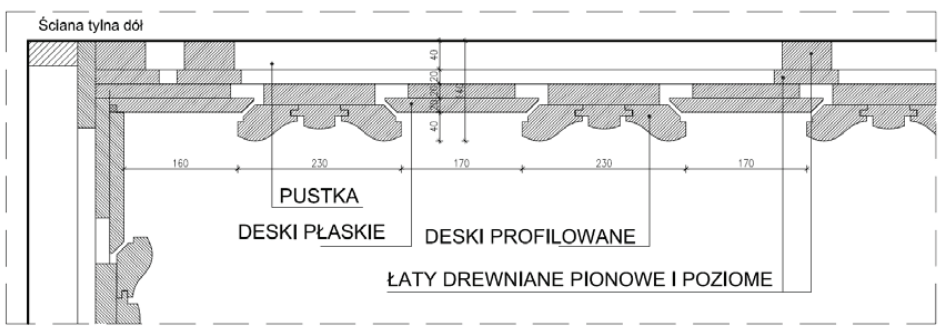
sufitu trafia także w stronę muzyków na estradzie, co przyczynia się do zwiększenia wzajemnej słyszalności muzyków w orkiestrze. Podobną funkcję akustyczną pełnią ściany boczne estrady.

Charakterystyczną cechą adaptacji akustycznych wnętrza sali są drewniane boazerie z płaskich i profilowanych desek o grubości około 20 mm i szerokości 20 – 23 cm (rys. 2 i 3). Deski te mocowane są do drewnianych łat w zróżnicowanych odstępach od ściany konstrukcyjnej.

Na bocznych ścianach estrady ustroje akustyczne montowane są w odstępie 35 mm od konstrukcji. Estrada Sali Koncertowej zbudowana jest z klepki dębowej o grubości 32 mm, na podłodze z desek 22 mm. Od spodu cała konstrukcja została obudowana płytami GKF ze względu na wymagania p.poż.

Ustroje akustyczne w części dolnej ścian bocznych widowni montowane są w odstępie 95 mm od konstrukcji. W części górnej ścian bocznych widowni odstęp ten ma 105 mm.

Ściana tylna pokryta jest dwoma typami ustrojów akustycznych: W części dolnej, do wysokości około 1 m, znajdują się profilowane oraz płaskie deski, podobnie jak na ścianach bocznych, ale w odstępie 60 mm. Górna część tylnej ściany pokryta jest perforowaną sklejką o grubości 10 mm. Perforacja ma otwory o średnicy 8 mm, w odstępach 80 x 80 mm. Płyty sklejki mocowane są w odstępie 65 mm od konstrukcji.



Rys. 2. Fragment typowej budowy ustroju akustycznego ścian. Na rysunku pokazana część dolna ściany tylnej

Fig. 2. A fragment of a typical acoustic structure of the walls. The figure shows the bottom part of the rear wall

Pułap akustyczny jest 20 mm sztablaturą na siatce podwieszonej do desek o grubości 20 mm.

Na podłodze amfiteatru widowni znajduje się parkiet na betonie konstrukcyjnym 5 cm.

Fotele mają wyściółkę średniej grubości i odchylane siedziska.

Opisane wyżej rozwiązania adaptacji akustycznych mają znaczący wpływ na ukształtowanie charakterystyki częstotliwościowej czasu pogłosu. Objawia się to stosunkowo krótkim czasem pogłosu sali w zakresie małych częstotliwości 63 -125 Hz, przy równomiernym wybrzmiewaniu dźwięku na całej widowni.

Rys. 3. Widok fotela w sali koncertowej
Fig. 3. View of the concert hall seat

3. BADANIA AKUSTYKI SALI KONCERTOWEJ

Badania akustyczne obejmowały następujące zagadnienia:

a) oceny słuchowe jakości dźwięku w sali podczas prób i koncertów,
b) pomiary parametrów akustycznych sali,
c) inwentaryzację akustyczną wnętrza,
d) modelowanie akustyczne sali,
e) rejestrację odpowiedzi impulsowych sali,
f) nagrania archiwalne prób orkiestry i koncertów.

3.1. Oceny słuchowe jakości dźwięku [4]

Oceny słuchowe (pkt a) programu badań) opracowano na podstawie ankiet i rozmów z dyrygentami, muzykami orkiestrowymi, reżyserami dźwięku, psychoakustykami i ekspertami muzycznymi.

Badania ankietowe dotyczące jakości dźwięku przeprowadzono wśród członków orkiestry i chóru. Repertuar stanowiący podstawę do oceny był zróżnicowany, zawierał muzykę symfoniczną, kameralną, koncert fortepianowy. W koncertach symfonicznych uczestniczyły duże zespoły wykonawcze – orkiestra symfoniczna 50 osób, chóry 60-80 osób, soliści. Liczba wykonawców była odpowiednio mniejsza w czasie koncertów kameralnych.

Pytania ankietowe dla członków orkiestry dotyczyły słyszalności, czytelności i barwy dźwięku własnego instrumentu, słyszalności dźwięku innych instrumentów swojej i innych sekcji, słyszalności i zrozumiałość słów dyrygenta, poczucia komfortu gry zespołowej, ogólnej oceny akustyki estrady i brzmienia sali. W podsumowaniu odpowiedzi na pytania ankietowe można przyjąć, że poszczególne elementy oceny, jak i ogólna ocena jakości akustycznej sali koncertowej jest zdaniem muzyków wysoka.

Dyrygenci oraz solistka pozytywnie ocenili walory akustyczne części audytoryjnej sali. Zastrzeżenia odnoszące się do komfortu gry na estradzie dotyczyły

geometrii estrady, która wymusza szerokie ustawienie zespołu i utrudnia wzajemny kontakt między skrajnie rozmieszczonymi grupami instrumentalnymi i chóralnymi.

W ocenie dyrygenta, brzmienie dźwięku w miejscu zajmowanym przez dyrygenta jest nadmiernie selektywne, natomiast w części audytoryjnej następuje scalenie obrazu dźwiękowego.

W opinii reżyserów dźwięku sala ma bardzo dobre warunki akustyczne do nagrań zespołów kameralnych oraz fortepianu, natomiast jest za mała do nagrań dużych składów symfonicznych. Salę cechuje dobra selektywność dźwięku instrumentów, przy jednoczesnej stopliwości barwy. Część reżyserów wskazała na trudności z uzyskaniem zadowalającej przestrzenności brzmienia i oddalenia planów dźwiękowych. Krytycznie oceniono niedostateczną izolację akustyczną sali od zakłóceń zewnętrznych i brak zaplecza do nagrań.

W opinii ekspertów zespołu badawczego, którzy mają wieloletnie doświadczenie jako uczestnicy grup ocen słuchowych, instrumenty orkiestry wybrzmiewają z pięknym, naturalnym pogłosem, sala charakteryzuje się precyzyjną lokalizacją instrumentów na estradzie, dobrą czytelnością dźwięku i wyrazistością artykulacji, ma wyrównaną barwę dźwięku we wszystkich obszarach widowni. Eksperci krytycznie ocenili w niektórych utworach brzmienie wielkiego składu orkiestry. Stwierdzili, że sala jest za mała do dużych składów, występuje niedostatek potęgi brzmienia i kłopoty ze słyszeniem solistów. Mimo tych zastrzeżeń, zespół ekspercki zgodnie uznał, że sala ma bardzo wyraziste i charakterystyczne brzmienie, którego walory powinno się zachować.

3.2. Pomiary fizyczne akustyki Sali

3.2.1. Metoda pomiarów

Pomiary parametrów akustycznych (pkt b/ programu badań) realizowano zgodnie z wytycznymi normy PN-EN ISO 3382-1 [5], „Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 1: Pomieszczenia specjalne" oraz norm związanych. Procedura pomiarów polegała na cyfrowej rejestracji odpowiedzi impulsowych sali, a następnie obliczeniu wartości poszczególnych parametrów i wskaźników akustycznych. Dźwięk testowy odtwarzano przez umieszczony na estradzie dwunastościenny zestaw głośnikowy dużej mocy. Pomiary wykonywano dwukrotnie, raz w sali zapełnionej przez publiczność i orkiestrę i drugi raz przy pustej estradzie i widowni (rys. 4).

3.2.2. Mierzone parametry i wskaźniki akustyczne sali

- czas wczesnego zaniku dźwięku EDT,
- czas pogłosu T30,
- wskaźnik przejrzystości dźwięku C80,
- wskaźnik czytelności dźwięku C50,
- siła dźwięku G,
- wskaźnik basów BI (Bass Index),
- czas opóźnienia wczesnych odbić ITDG,
- wskaźniki wspomagania akustycznego estrady ST_{early} i ST_{late},
- wskaźnik zrozumiałości mowy STI,
- współczynnik korelacji międzyusznej IACC,

- wskaźnik jakości binauralnej BQI (Binaural Quality Index),
- miary przestrzenności dźwięku: LEV (Listener Envelopment) i DSB (Degree of Source Broadening),
- poziom hałasu LA i wskaźnik NR hałasu,
- izolacyjność akustyczna D_{nTw} sali koncertowej od źródeł hałasu w foyer i w sali kameralnej.

Rys. 4. Dwunastościenny głośnik na estradzie podczas pomiarów parametrów akustycznych sali z orkiestrą i publicznością

Fig. 4. A dodecahedron loudspeaker on the stage when measuring acoustic parameters of the concert hall with orchestra and audience

3.2.3. Wyniki pomiarów akustycznych sali koncertowej

W normie PN-EN ISO 3382-1 wyodrębniono pięć grup wrażeń słuchowych, które można oceniać liczbowo na podstawie pomiarów akustycznych sal:

a) subiektywny poziom (głośność) dźwięku,
b) pogłosowość,
c) przejrzystość dźwięku,
d) wrażenie otoczenia dźwiękiem LEV,
e) pozorne zwiększenie szerokości źródeł dźwięku ASW.

Wrażenia grupy D i E są podstawowymi wymiarami przestrzenności dźwięku w salach. Skorelowane z tymi wrażeniami słuchowymi wskaźniki akustyczne sal to:

ad a) siła dźwięku G, dB,
ad b) czas wczesnego zaniku dźwięku EDT, s,
ad c) wskaźniki przejrzystości dźwięku C80, dB, czytelności C50, dB, i czas środkowy Ts, s,
ad e) i f) wskaźnik udziału energii bocznej J_{LF}, J_{LFC} lub współczynnik korelacji międzyusznej IACC.

Ze stosunkowo długiej listy zmierzonych wskaźników akustycznych z p. 3.2.2 wybrano najbardziej charakterystyczne dane z pomiarów akustycznych sali pustej i sali zapełnionej przez publiczność i orkiestrę. Są to:

1) charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu T30,
2) charakterystyka częstotliwościowa czasu wczesnego zaniku dźwięku EDT,
3) siła dźwięku G,
4) wskaźnik basów BI,
5) wskaźnik jakości binauralnej BQI,
6) wskaźniki przestrzenności LEV i DSB [1].

Czas pogłosu T30

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiaru czasu pogłosu T30, s, w pasmach oktawowych 63 Hz – 8 kHz, w sali pustej i zapełnionej przez publiczność i orkiestrę. Wykres tych charakterystyk znajduje się na rysunku 5.

Tab. 1. Charakterystyki czasu pogłosu T30, s, w sali pustej i z publicznością
Tab. 1. Reverberation time T30, s, empty and occupied hall

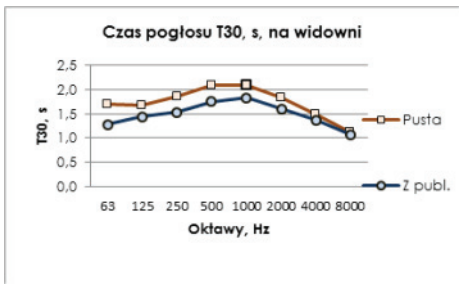
f, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30, s, bez pub.	1,7	1,7	1,9	**2,1**	**2,1**	1,8	1,5	1,1
T30, s, z pub.	1,3	1,4	1,5	**1,7**	**1,8**	1,6	1,4	1,1

Pomiary pokazały, że zapełnienie sali przez publiczność powoduje skrócenie czasu pogłosu T30 o 0.3 s (15%). Jest to zmiana wyraźnie zauważalna, ponieważ jest trzykrotnie większa od wartości progowej jnd = 5% (*just noticed difference*). Taka zmiana czasu pogłosu jest jednak zjawiskiem normalnym i wynika z różnicy między pochłanianiem dźwięku przez puste fotele i fotele z osobami siedzącymi. Zmiana czasu pogłosu o 15% jest łatwo rozpoznawana przez muzyków i może wpływać na sposób gry podczas prób i podczas koncertów.

Czas wczesnego zaniku dźwięku EDT

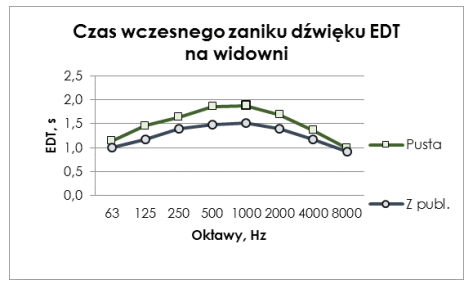
Tab. 2. Charakterystyki czasu wczesnego zaniku dźwięku EDT, s, w sali pustej i z publicznością
Tab. 2. Early decay time EDT, s, empty and occupied hall

f, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30, s, bez pub	1,1	1,5	1,6	**1,9**	**1,9**	1,7	1,4	1,0
T30, s, z pub	1,0	1,2	1,4	**1,5**	**1,5**	1,4	1,2	0,9



Rys. 5. Charakterystyki czasu pogłosu T30, s, w sali pustej i z publicznością. Wynik pomiaru: T30 = 2,1 s w sali pustej, 1,8 s w sali zapełnionej (średnie z oktaw 500 Hz – 1 kHz). Zalecana wartość czasu pogłosu sali z publicznością T = 1,7 – 2,2 s

Fig. 5. Reverberation time T30, s, empty and occupied hall. Measurement result: T30 = 2,1 s in empty room, 1,8 s in occupied hall (mean from octaves 500 Hz - 1 kHz). Recommended value of reverberation time for the occupied hall T = 1,7 – 2,2 s



Rys. 6. Charakterystyki czasu wczesnego zaniku dźwięku EDT, s, w sali pustej i z publicznością. Wynik pomiaru: EDT = 1,9 s w sali pustej, 1,5 s w sali zapełnionej (średnie z oktaw 500 Hz – 1 kHz). Zalecana wartość EDT dla sali z publicznością = 1,4 – 2,0 s

Fig. 6. Early decay time EDT, s, empty and occupied hall. Measurement result: EDT = 1.9 s in empty hall, 1.5 s in occupied hall (mean from octaves 500 Hz - 1 kHz). Recommended EDT value for the occupied hall = 1.4 – 2.0 s

Zapełnienie sali przez publiczność powoduje skrócenie czasu EDT o 0,4 s (21%). Wynika stąd, że zmiana pogłosowości sali po zapełnieniu sali publicznością i orkiestrą jest znacząca i łatwo rozpoznawalna przez muzyków. W badaniach ankietowych nie pojawiły się jednak sygnały o negatywnym wpływie zmian pogłosowości sali na pracę muzyków.

Siła dźwięku $G_{0,80}$, G_{late} i G_{total}

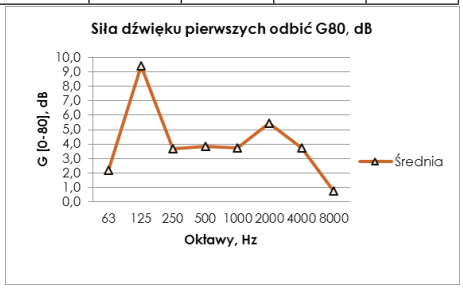
Siła dźwięku G, dB, jest bardzo użyteczną miarą ilości dodatkowej energii dostarczanej przez odbicia dźwięku w pomieszczeniu, w porównaniu z energią dźwięku fali bezpośredniej. $G_{0,80}$, G_{late} i G_{total} dotyczy odpowiednio okresu pierwszych 80 ms, po 80 ms i całego czasu trwania odpowiedzi impulsowej.

W tabeli 3 zestawiono wartości średnie siły dźwięku $G_{0,80}$, G_{late} i G_{total}.

Tab. 3. Widma oktawowe siły dźwięku $G_{0,80}$, G_{late} i G_{total}, dB.
Tab. 3. Octave spectra of the sound strength $G_{0,80}$, G_{late} i G_{total}, dB.

f, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
G_{total}, dB średnia	3.3	11.8	6.5	6.9	6.8	8.5	5.8	1.9
$G_{0,80}$, dB średnia	2.2	9.4	3.7	3.9	3.8	5.5	3.7	0.7
G_{late}, dB średnia	-0.1	9.7	4.5	4.4	4.1	5.6	2.1	-4.0

Wskaźnik basów BI, dB zdefiniowany [2] jest jako różnica między wartością G_{total} w paśmie 125 Hz, a średnim G z oktaw 500 Hz – 1 kHz. Wskaźnik Basów BI w badanej sali wyniósł 5 dB. Według Beranka, dodatnie wartości BI są korzystną cechą sal koncertowych (rys. 7).



Rys. 7. Widma oktawowe siły dźwięku $G_{0,80}$, dB. $G_{0,80}$ (500 Hz – 1 kHz) = 3,8 dB. $G_{0,80}$ (125 Hz) = 9,5 dB.

Fig. 7. Octave spectra of the sound strength $G_{0,80}$, dB. $G_{0,80}$ (500 Hz - 1 kHz) = 3.8 dB. $G_{0,80}$ (125 Hz) = 9.5 dB.

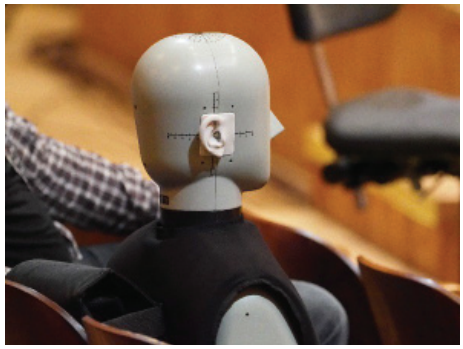
Wskaźnik jakości binauralnej BQI [1]

Wskaźnik jakości binauralnej BQI oblicza się jako odstęp współczynnika korelacji międzyusznej od liczby 1. BQI = 1 – $IACC_{late,mid}$ przyjmuje wartości z przedziału 0 – 1. BQI = 0 odnosi się do sytuacji, gdy sygnały dochodzące do obu uszu są identyczne, co zmysł słuchu interpretuje jako obecność słuchacza w środowisku pozbawionym cech przestrzenności dźwięku. BQI = 1 informuje o całkowitym braku korelacji między sygnałami dochodzącymi do lewego i prawego ucha. Optymalna wartość BQI mieści się w zakresie 0,6 – 0,8.

Do pomiaru wskaźnika BQI zastosowano sztuczną głowę z wkładkami usznymi, w których umieszczone były mikrofony w lewym i w prawym kanale usznym manekina (rys. 8 i 9).

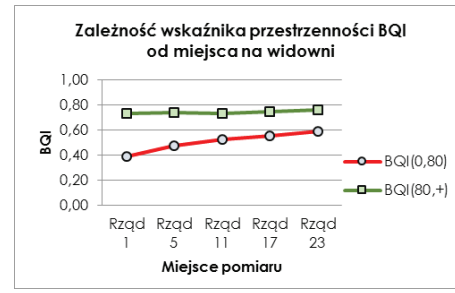
Wskaźniki przestrzenności dźwięku LEV i DSB w sali koncertowej

Jednym z istotniejszych, ocenianych wrażeń słuchowych, które zapewniają dobre sale koncertowe, jest przestrzenność dźwięku przy odbiorze muzyki. W badaniach wykorzystano metodę pomiaru i obliczeń wskaźników przestrzenności opublikowaną przez Beranka [4] w JASA, w 2011 roku.



Rys. 8. Sztuczna głowa prod. Bruel&Kjaer, z mikrofonami pomiarowymi umieszczonymi w kanałach usznych

Fig. 8. Bruel & Kjaer artificial head, with measuring microphones placed in the ear canal



Rys. 9. Zależność wskaźnika BQI od miejsca na widowni. W okresie pierwszych 80 ms BQI zmienia się od 0,4 do 0,6 przy oddalaniu od estrady. W dłuższym przedziale czasu (80,+) BQI utrzymuje stałą wartość 0,73, jak w renomowanych salach koncertowych

Fig. 9. The influence of distance from the sound source on stage on the BQI index. In the first 80 ms, BQI changes from 0.4 to 0.6 when moving away from the stage. After 80 ms (80, +), BQI maintains a fixed value 0.73, just like in renowned concert halls

Według Beranka, przestrzenność w salach koncertowych ocenia się za pomocą dwóch wskaźników liczbowych, LEV (Listener Envelopement), dB i DSB (Degree of Source Broadening), dB. Metoda ta jest zgodna z wytycznymi cytowanej wcześniej normy PN-EN ISO 3382-1.

Algorytm obliczeniowy opiera się na rejestracji odpowiedzi impulsowych na widowni i obliczeniu w pasmach oktawowych, składowych siły dźwięku G i współczynnika korelacji międzyusznej IACC. Dane do oceny pozornej szerokości źródła dźwięku DSB obejmują przedział [0 – 80] ms. Wskaźnik LEV, skorelowany z wrażeniem otoczenia dźwiękiem, obliczany jest z późniejszej fazy odpowiedzi impulsowej, po upływie 80 ms.

Miarę wrażenia otoczenia dźwiękiem LEV (Listener Envelopment) obliczano z wzoru:

$$LEV = 0{,}5\ G\ [80, +]mid\ + 10\log(1 - IACC\ [80, +]mid,\ \text{dB}$$

Stopień zwiększenia pozornej szerokości źródła dźwięku DSB (Degree of Source Broadening) obliczano z wzoru:

$$DSB = 31 \cdot (1 - IACC\ [0{,}80]) + 5/3\ [0{,}80]\ \text{dB}$$

- *mid* oznacza średnią z trzech pasm oktawowych: 500, 1000 i 2000 Hz.
- *G[0,80]* oznacza wyniki obliczeń w okienku czasowym 0 – 80 ms, w oktawach 500 i 1000 Hz. Przykładowe obliczenia wskaźników oceny przestrzenności dźwięku w sali koncertowej:

  Dane wejściowe:

  $BQI_{Early} = 1 - IACC_{Early}$: 0,66,

  $G_{Early,mid}$: 3,8 dB,

  $BQI_{Late} = 1 - IACC_{Late}$: 0,84,

  $G_{Late,mid}$: 4,3 dB.

Obliczenia:
1. DSB = 31 · 0,66 + 0,8 = **26,8 dB**
2 LEV = 0,5 · 4,3 + 10 · log(0,84) = **1.00 dB**

Interpretacja wyników oszacowania jakości akustycznej sali koncertowej:

1. Wskaźnik DSB = 26,8 dB jest wysoką oceną składowej przestrzenności dźwięku. Wśród dużych sal koncertowych oceny takie mają sale najwyżej cenione w światowym rankingu jakości akustycznej, jak Berlin Konzerthaus, Musikvereinsaal w Wiedniu.
2. Wskaźnik LEV = 1,4 dB charakteryzuje drugi wymiar przestrzenności badanej sali. Podobną liczbę punktów w rankingu dużych sal mają znakomite sale koncertowe w świecie, jak Concertgebouw, Basel, Stdt-Casino i Musikverein. Z drugiej strony, LEV w salach kameralnych z bazy danych Beranka, z liczbą miejsc 500 – 600, wynosi średnio 2.8 dB. Sala Koncertowa Filharmonii Pomorskiej przeznaczona jest dla 886 słuchaczy. Zmierzony LEV mieści się w naturalnym przedziale wartości między salami dużymi a małymi.

Rys. 10. Skaner Leica P20
Fig. 10. Leica P20 scanner

3.3. Inwentaryzacja akustyczna sal

Pomiary inwentaryzacyjne (pkt c) programu badań) dotyczyły dwóch zadań: (1) aktualizacji wymiarów sali z zastosowaniem skaningu laserowego, (2) pomiarów *in-situ* współczynników pochłaniania dźwięku materiałów i ustrojów akustycznych wnętrza sali.

3.3.1. Skaning laserowy

Technologię skanowania laserowego zastosowano do zebrania danych geometrycznych wnętrza sali koncertowej. Dane te posłużyły do weryfikacji wymiarowej, archiwalnej dokumentacji architektoniczno-budowlanej obiektu. Wykorzystane urządzenia:

- skaner laserowy Leica P20 (rys. 10). Dane geometryczne zbierane są w postaci chmury punktów. Pomiar odległości do każdego punktu odbywa się metodą impulsową
- z dokładnością 2 mm, z prędkością 10^6 punktów/s,
- tachimetr TS09 R1000 (rys. 11) zastosowano do pomiaru współrzędnych pomocniczych punktów odniesienia w sali. Pomiar współrzędnych odbywa się ze zwiększoną dokładnością w porównaniu do skanera P20,
- aparat Ricoh Theta (rys. 12) zastosowano do wykonania archiwalnych zdjęć panoramicznych 360^0.

Rys. 11. Tachimetr TS09 R1000
Fig. 11. TS09 R1000 tachimetr

Rys. 12. Aparat Ricoh Theta
Fig. 12.The Ricoh Theta camera

Skanowanie laserowe wykonano z rozdzielczością 6mm/10m i zapisywano jako chmura punktów o gęstości 2 mm. Wykonano łącznie 19 skanów sali koncertowej. W sali zostały rozmieszczono tarcze pomiarowe jako punkty odniesienia do łączenia skanów. Współrzędne środków tarcz zostały zmierzone w lokalnym układzie współrzędnych za pomocą tachimetru TS09.

Na rysunku 13 pokazano przykładową chmurę punktów zwizualizowanych za pomocą koloru oraz intensywności.

Rys. 13. Przykładowa chmura punktów obrazująca wnętrze sali koncertowej
Fig. 13. An example of a cloud of points showing the interior of the concert hall

3.4. Pomiary współczynników pochłaniania dźwięku *in situ*

Pomiar *in situ* jest nowoczesną i innowacyjną, niestety wciąż okazjonalnie stosowaną metodą wyznaczania wartości współczynnika pochłaniania materiałów i ustrojów, zabudowanych w sali w sposób trwały. W przypadku historycznych obiektów, jak sala koncertowa Filharmonii Pomorskiej, użycie takiej metody pomiaru współczynników pochłaniania dźwięku dla celów inwentaryzacji właściwości materiałów, zamontowanych kilkadziesiąt lat temu jest szczególnie uzasadnione. Metoda pomiarów *in situ* umożliwia określenie wartości współczynników pochłaniania w sytuacji, w której brak stosownej dokumentacji, a jest dobrą alternatywą w miejsce korzystania z arbitralnie dobieranych wartości współczynników pochłaniania, na podstawie dostępnych tabel materiałów. Ponadto, pomiar *in situ* umożliwia określenie wartości współczynników pochłaniania dźwięku w rzeczywistych warunkach zamontowania elementów konstrukcyjnych.

3.4.1. Metoda pomiarowa i aparatura badawcza

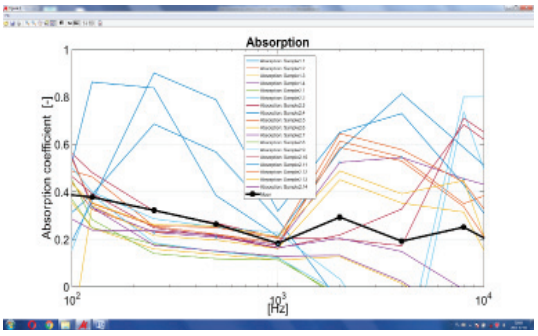
W pomiarach sali zastosowano sondę pomiarową firmy Microflown Technologies (rys.14). Przy użyciu tej sondy współczynnik pochłaniania określany jest na podstawie pomiaru współczynnika odbicia fali akustycznej od powierzchni elementu. Sonda składa się z próbnika pomiarowego zawierającego scalone – czujnik pomiaru prędkości akustycznej oraz mikrofon pomiarowy – oraz z głośnika stanowiącego źródło sygnału pomiarowego. Jednoczesny pomiar ciśnienia

i prędkości akustycznej pozwala na wyznaczenie współczynnika odbicia, następnie przeliczenie na wartości natężenia dźwięku fali padającej i odbitej, z których ostatecznie wyznaczany jest energetyczny współczynnik pochłaniania ściany, ustroju lub elementu wyposażenia sali.

Pomiary w sali koncertowej obejmowały wszystkie powierzchnie boazerii (estrady i widowni), powierzchnie górnych paneli drewnianych ścian widowni, sufit nad estradą i widownią, podłogi estrady i widowni, drzwi wyjściowe do foyer, miękką powierzchnię siedziska foteli oraz prospekt organowy.

Rys. 14. Sonda do pomiaru energetycznego współczynnika pochłaniania *in situ* firmy Microflown.

Fig. 14. Probe of Microflown Technologies for the in-situ measurement of absorption coefficient.



Rys 15. Współczynnik pochłaniania w pasmach 1/1 oktawowych zmierzony *in situ*. Punkt pomiarowy na bocznej ścianie estrady. Uśrednienie pomiarów w 18 punktach odległych o 2 cm w kierunku poziomym. Falista boazeria listwowa.

Fig. 15. Absorption coefficient in 1/1 octave bands measured in situ. Measuring point on the stage's side wall. Averaging of measurements at 18 points deviated by 2 cm in the horizontal direction. Corrugated paneling

3.4.2. Wyniki pomiarów

Współczynniki pochłaniania w pasmach 1/1 oktawowych i 1/3 oktawowych podstawowych powierzchni i elementów wyposażenia sali koncertowej przedstawiono w formie tabelarycznej oraz na wykresach współczynników. Organy są rzadko mierzonym obiektem. Wyniki pomiaru współczynnika pochłaniania organów przedstawiono oddzielnie dla trzech sekcji bocznych piszczałek prospektu instrumentu oraz niezależnie sekcji środkowej instrumentu, która uzyskała wartość współczynnika pochłaniania przekraczającą 0.99.

Na rysunku 15 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów ściany bocznej estrady, wykonanej, jako głęboko profilowana boazeria drewniana. Profilowanie takie znacząco wpływa na wartość lokalnie rejestrowanego współczynnika pochłaniania dźwięku.

3.4.3. Podsumowanie pomiarów *in situ*

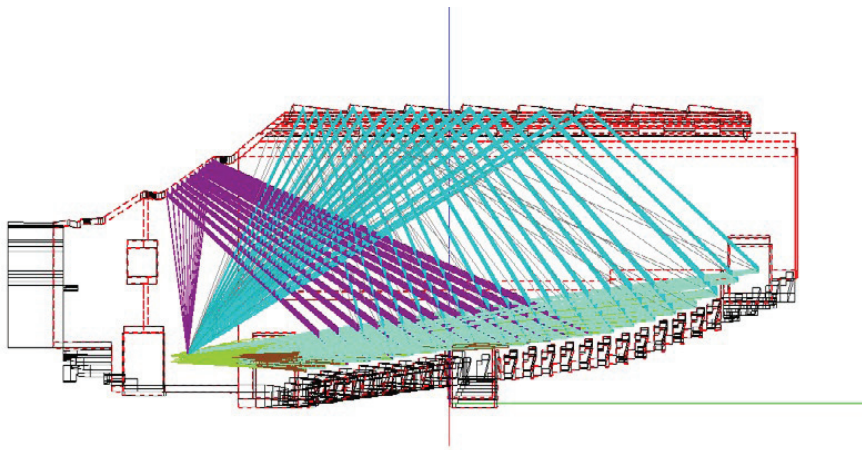
Pomiary *in situ* współczynnika pochłaniania najważniejszych powierzchni i elementów wyposażenia sali koncertowej Filharmonii stanowi rzeczywistą dokumentację materiałów i ustrojów akustycznych w obecnie istniejącej konstrukcji, co nie byłoby możliwe do pozyskania innymi metodami, bez ingerencji w strukturę

sali. Otrzymane wartości współczynników mogą być wykorzystane na różne sposoby, m.in. w modelowaniu numerycznym sali. Innowacyjny pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku *in situ* za pomocą sondy Microflown jest najnowszą, uznaną w świecie metodą pomiarów tego współczynnika.

3.5. Modelowanie akustyki sali

Model akustyczny sali (pkt d/ programu badań) jest numerycznym obrazem 3D architektury wnętrza. Każdej powierzchni ograniczającej przestrzeń 3D modelu sali przypisane zostały parametry akustyczne, tj. współczynniki pochłaniania i rozpraszania dźwięku. Za pomocą modelu wykonano badania symulacyjne propagacji dźwięku w sali. Wynikiem symulacji są odpowiedzi impulsowe, które stanowią podstawę do wyznaczenia parametrów akustycznych wirtualnej przestrzeni sali oraz do auralizacji, czyli nałożenia brzmienia sali na nagrania próbek dźwięku. Auralizacja próbek dźwięku może służyć do porównawczej oceny słuchowej brzmienia sali w fazie projektowania i podczas realizacji inwestycji remontowej.

Jednym z interesujących wyników modelowania jest przedstawiona na rysunku 16 graficzna analiza kierunków propagacji dźwięku, wizualizacja tras promieni dźwiękowych i miejsc zetknięcia promieni z ustrojami akustycznymi i widownią oraz oceny intensywności i rozkładu wczesnych odbić dźwięku na widowni.



Rys. 16. Graficzna analiza kierunków propagacji dźwięku z wizualizacją tras promieni dźwiękowych i miejsc zetknięcia promieni z ustrojami akustycznymi i widownią, umożliwiająca ocenę intensywności i rozkładu wczesnych odbić dźwięku na widowni.

Fig. 16. Graphic analysis of the directions of sound propagation with the visualization of the routes of sound rays and the places where the rays hit the acoustic treatment on ceiling and the audience, enabling the assessment of the intensity and distribution of early sound reflections in the audience.

Numeryczne modelowanie akustyki sali jest jedną z możliwych do stosowania metod utrwalania i archiwizacji akustyki sal. Inną metodą tworzenia modelu sali i archiwizacji akustycznych walorów sali jest zapis mierzonych w obiekcie odpowiedzi impulsowych sali pustej, a także w obecności orkiestry i publiczności (pkt e/ programu badań). Splot próbek dźwięku z zarejestrowanymi odpowiedziami impulsowymi umożliwi w dowolnym czasie słuchową ocenę brzmienia sali,

w sposób podobny do auralizacji próbek dźwięku w numerycznym modelowaniu architektury i akustyki wnętrz.

3.6. Nagrania archiwalne

Archiwalne nagrania prób orkiestry i koncertów (pkt f/ programu badań) wykonano techniką binauralną oraz ambifoniczną. Nagrania przeznaczone są do porównawczych ocen słuchowych brzmienia sali w okresie projektowania robót budowlanych, a następnie w czasie późniejszej przebudowy sali.

4. OCHRONA AKUSTYKI TEATRÓW I SAL KONCERTOWYCH JAKO NIEMATERIALNEGO DZIEDZICTWA KULTUROWEGO

Walory akustyczne dobrych, zabytkowych teatrów i sal koncertowych uznawane są w świecie jako szczególnie cenne niematerialne dobro kultury. Opiekę nad zabytkami oraz wszelkim dziedzictwem kultury w Polsce sprawują Minister Kultury i Dziedzictwa Narodowego oraz wojewodowie na mocy ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami oraz na mocy ratyfikowanych przez Polskę przepisów prawa międzynarodowego. Zadania i kompetencje w ramach ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami wykonuje Generalny Konserwator Zabytków – w imieniu Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego oraz Wojewódzki Konserwator Zabytków – w imieniu wojewody. Celem ich działania jest ochrona zabytków, w szczególności zapobieganie zagrożeniom mogącym spowodować uszczerbek dla wartości zabytków, udaremnienie niszczenia i niewłaściwego korzystania z zabytków, kontrolowanie stanu zachowania i przeznaczenia zabytków.

Ustawa o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami [6] odnosi się w swoich uregulowaniach do rzeczy materialnych, jakimi są zabytki nieruchome, ruchome i archeologiczne. Zabytki te w celu ich ochrony mogą zostać wpisane do rejestru zabytków prowadzonego przez wojewódzkich konserwatorów zabytków, wpisane na Listę Skarbów Dziedzictwa prowadzoną przez Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego, uznane za pomnik historii, pod warunkiem, że wcześniej został wpisany do rejestru. Warto również wspomnieć, że do zadań Generalnego Konserwatora Zabytków należy tworzenie 4-letniego Krajowego Programu Ochrony Zabytków i Opieki nad Zabytkami, który z kolei wdrażany jest przez Narodowy Instytut Dziedzictwa.

Prawna ochrona niematerialnego dziedzictwa kultury [3] została przyjęta w Konwencji UNESCO sporządzonej w Paryżu 17 października 2003 r. i ratyfikowanej przez Polskę w roku 2011. W rozumieniu Konwencji UNESCO dziedzictwo niematerialne to zwyczaje, przekaz ustny, wiedza i umiejętności oraz związane z nimi przedmioty i przestrzeń kulturowa, które są uznane za część własnego dziedzictwa przez daną wspólnotę, grupę lub jednostki. Na podstawie Konwencji, w celu ochrony niematerialnego dziedzictwa kultury tworzone są trzy rejestry: lista reprezentatywna niematerialnego dziedzictwa kulturowego ludzkości, lista elementów dziedzictwa wymagającego pilnej ochrony i rejestr dobrych praktyk w zakresie ochrony niematerialnego dziedzictwa kulturowego. W Polsce, Krajowa lista niematerialnego dziedzictwa kulturowego jest prowadzona przez Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego, we współpracy z Narodowym Instytutem Dziedzictwa.

Wyjątkowa „akustyka" sal teatralnych i koncertowych jest bez wątpienia wartością, która powinna być chroniona. Należałoby rozważyć, czy walory aku-

styczne sali lub innych przestrzeni są w świetle obowiązujących regulacji prawnych elementami materialnego, czy niematerialnego dziedzictwa kultury. W przypadku uznania akustyki jako dobro materialne, opiekunem byłby Wojewódzki Konserwator Zabytków. Można także uznać, że cechą wyróżniającą salę koncertową lub teatr jest w ocenach słuchaczy nadzwyczaj piękna barwa dźwięku, która należy do kategorii estetycznych wrażeń słuchowych i jest właściwością niematerialną. W takim rozumieniu, właściwym organem ochronnym byłby Minister Kultury i Dziedzictwa Narodowego we współpracy z Narodowym Instytutem Dziedzictwa.

Dobre właściwości akustyczne sal uzyskuje się przez przemyślny dobór kształtu wnętrza i przez odpowiedni dobór elementów wystroju akustycznego, wykładzin, rozrzeźbień i zdobień, należących do architektury jako stałe elementy nieruchomości. Salę wraz z jej akustyką można byłoby wtedy objąć ochroną poprzez wpis do rejestru zabytków.

Ten sam efekt architektoniczny, wizualny i estetyczny można również uzyskać za pomocą innych materiałów i ustrojów akustycznych. Sytuacja taka ma miejsce przy renowacji obiektów. Istnieje zawsze ogromna niepewność, czy taka replika oryginału zapewni odtworzenie walorów brzmieniowych sali, pomimo zachowanego podobieństwa architektury.

Wydaje się, że lepszą ochronę i opiekę nad zabytkiem „akustycznym" zapewniłby wpis obiektu akustycznego do rejestru zabytków niematerialnych. Wpis do tego rejestru byłby możliwy, jeśli akustyka teatrów i sal koncertowych zostałaby w Konwencji UNESCO uznana jako niematerialny element zasobów dziedzictwa kultury. Postulat taki należałoby zgłosić do Krajowego Programu Ochrony Zabytków i Opieki nad zabytkami Narodowego Instytutu Dziedzictwa, który odpowiada za przygotowanie, monitoring, realizację i ewaluację zadań, w tym między innymi za ewaluację i doskonalenie systemu ochrony i ewidencji dziedzictwa materialnego i niematerialnego.

LITERATURA

[1] Beranek L., 2002. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture, Second Edition. Springer.

[2] Beranek L., 2011. The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music, J. Acoust. Soc. Am. 129 (5).

[3] Konwencja UNESCO w sprawie ochrony niematerialnego dziedzictwa kulturowego, Paryż, 17 października 2003 r.

[4] Łukaszewicz M. i inni (praca zbiorowa), 2017. Charakterystyka właściwości akustycznych sali koncertowej oraz sali kameralnej Filharmonii Pomorskiej. Raport opracowany na podstawie słuchowych ocen dźwięku oraz badań akustycznych sal w stanie aktualnym. Manufaktura Technologiczna Piaseczno.

[5] PN-EN ISO 3382-1: 2009 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 1: Pomieszczenia specjalne.

[6] Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, Dz. U. 2003 Nr 162 poz. 1568.

AKUSTYKA TEATRÓW I SAL KONCERTOWYCH JAKO NIEMATERIALNY ELEMENT DZIEDZICTWA KULTURY

STRESZCZENIE. Istnieje wiele obiektów kultury wpisanych do rejestru zabytków. Wpis do rejestru dotyczy na ogół zabytków ruchomych i nieruchomych, jak rękodzieła, instrumenty muzyczne, dzieła architektury i budownictwa. Szczególną niematerialną cechą wyróżniającą niektóre sale koncertowe i teatry jest nadzwyczaj piękna barwa dźwięku i doskonałe warunki do naturalnego jego przekazu.

Jednym z takich wnętrz jest sala koncertowa im. Artura Rubinsteina Filharmonii Pomorskiej im. Ignacego Paderewskiego w Bydgoszczy. Budynek i wnętrza filharmonii wymagają remontu i modernizacji po 60 latach użytkowania. Z uwagi na wyjątkowe walory brzmieniowe sali koncertowej, władze podjęły niezbędne starania o techniczne udokumentowanie jej walorów akustycznych. Niezbędny zakres badań i sposób dokumentowania wymagał dużej liczby danych inwentaryzacyjnych.

Sala uzyskała w badaniach bardzo wysoką ocenę akustyczną w opinii ekspertów muzycznych, a także w technicznej ocenie parametrów fizycznych. Uznano, że sala i jej walory akustyczne powinny podlegać szczególnej ochronie prawnej jako historyczny obiekt i światowej rangi niematerialny zabytek kultury.

ACOUSTICS OF THEATERS AND CONCERT HALLS AS AN INTANGIBLE ELEMENT OF HERITAGE OF CULTURE

SUMMARY. There are many cultural objects entered in the register of monuments. Entry in the register usually concerns movable and immovable monuments, such as handicrafts, musical instruments, works of architecture and construction. A particularly intangible feature that distinguishes some concert halls and theaters is the extremely beautiful timbre and excellent acoustic conditions for its natural transmission.

One of such interiors is the Artur Rubinstein concert hall of the Ignacy Paderewski Pomeranian Philharmonic in Bydgoszcz. The building and interiors of the philharmonic hall need renovation and modernization after 60 years of use. Due to the unique sound qualities of the concert hall, the authorities have made the necessary efforts to provide technical documentation of its acoustic qualities. The specific scope of research and the way of doc-umenting required the collection and processing of a large number of inventory data. The article contains more important results of the hall's research.

The concert hall obtained in the research a very high acoustic evaluation in the opin-ion of music experts, as well as in the technical assessment of the measured physical param-eters. The authors stated that the concert hall and its acoustic qualities should be the subject of special legal protection as a historical object and as a world-class intangible cultural monument.

Key words: concert halls, theaters, register of immovable monuments, acoustics, auditory evaluations, physical measurements, entry to the register of intangible cultural heritage