

TADEUSZ KAMISIŃSKI\*, ROMAN KINASZ\*\*,  
JAROSŁAW RUBACHA\*, ADAM PILCH\*

## KOREKTA AKUSTYCZNA WNĘK PODBALKONOWYCH W SALI OPERY LWOWSKIEJ

### ACOUSTICAL CORRECTION OF UNDER BALCONY CAVITIES IN LVIV OPERA HALL

#### Streszczenie

W związku z modernizacją Opery Lwowskiej, wykonano pomiary akustyczne sali Opery wraz z komputerową symulacją pola akustycznego. W symulacji uwzględniono dane akustyczne przewidywanych do zastosowania materiałów wykończeniowych i ustrojów akustycznych, uzyskane z pomiarów laboratoryjnych. W szczególności badaniom poddano ustroje rozpraszające dźwięk typu QRD, zaprojektowane specjalnie dla tej sali z uwzględnieniem architektonicznego stylu obiektu

*Słowa kluczowe: akustyka sali, rozproszenie dźwięku, adaptacja akustyczna*

#### Abstract

Due to modernization of the Lviv Opera hall, acoustical measurements of the hall have been performed together with computer simulation of sound field. In the computer model, acoustical data of finishing materials and acoustical structures obtained from laboratory tests have been used. In particular, QRD sound diffusing structures have been examined. The structures were designed specifically for this hall, with taking into account its architectural style.

*Keywords: room acoustic, sound diffusion, adaptation*

\* Dr inż. Tadeusz Kamisiński, mgr inż. Jarosław Rubacha, mgr inż. Adam Pilch, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie.

\*\* Prof. dr hab. inż. Roman Kinasz, Katedra Konstrukcji Architektonicznych, Wydział Architektury, Politechnika Lwowska; Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie.

## 1. Wstęp

Lwowski Akademicki Teatr Opery i Baletu im. Salomei Kruszelnickiej, zwany dalej Operą Lwowską, jest szczególną budowlą, zajmującą ważne miejsce w architekturze i kulturze Lwowa. Obiekt zbudowany w 1900 roku zaprojektował Zygmunt Gorgolewski, jeden z najwybitniejszych ówczesnych architektów. Widownia posiada kubaturę 4374 m<sup>3</sup> i mieści 998 osób (il. 1). Pudło sceny jest wyposażone w zaawansowaną technologię z ruchomymi platformami. Budynek jest obecnie gruntownie remontowany, zaś sala jest doprowadzana do pierwotnej świetności. W 2008 roku, podczas letniej przerwy repertuarowej, przeprowadzono wymianę podłóg i odświeżenie wnętrza. W celu zachowania parametrów akustycznych sali, w trakcie prac modernizacyjnych prowadzono bieżące ekspertyzy akustyczne.

Część ekspertyz przeprowadzono na komputerowym modelu sali przy użyciu programu CATT-Acoustic. Dane do obliczeń uzyskano z inwentaryzacji architektonicznej oraz pomiarów akustycznych sali w stanie sprzed remontu. Pomiarów objęły parametry akustyczne sali oraz laboratoryjne badania właściwości akustycznych materiałów wykończeniowych (deski podłogowe, dywany, lambrekiny, tapicerka foteli).

Wyniki pomiarów wskazują na niedostatki akustyczne w części widowni znajdującej się pod balkonami (il. 2 i 3) [1, 3, 4]. Jako kroki zaradcze przewidziano zastosowanie rozpraszaczy dźwięku typu QRD, wprowadzanych do użytku w salach widowiskowych w ostatnich latach [2]. Rozpraszacze tego typu nie były znane w czasach wznoszenia obiektu, ich projekt wymagał więc uwzględnienia architektonicznego stylu wnętrza.



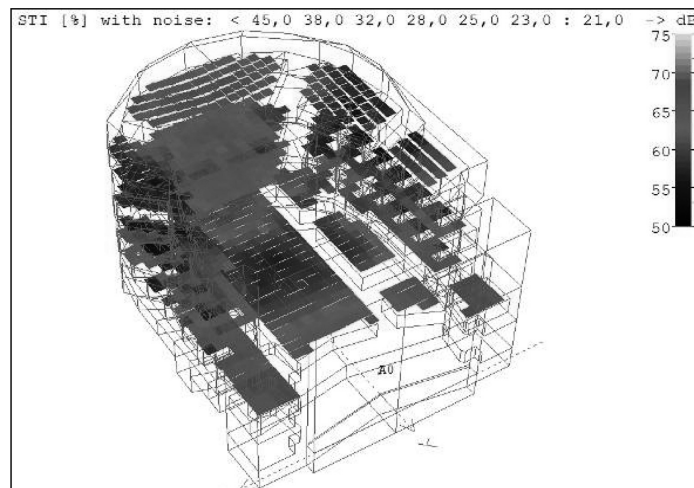
II. 1. Widownia sali Opery we Lwowie

III. 1. The Lviv Opera house concert hall



II. 2. Tylna ściana parteru

III. 2. Back wall of ground floor



Il. 3. Rozkład parametru STI na widowni po wykonaniu modernizacji w 2008 r.

III. 3. Distribution of parameter STI in the hall after modernization in 2008 year

## 2. Badania laboratoryjne rozpraszaczy QRD

Rozproszenie dźwięku jest jednym z ważniejszych, lecz trudnych do uzyskania czynników dobrej akustyki pomieszczenia. Na rozproszenie dźwięku ma wpływ kształt pomieszczenia, jego wykończenie oraz elementy wyposażenia. Stosowane od dawna w budownictwie dekoracyjne detale architektoniczne sprzyjały rozproszeniu dźwięku. Jednak współczesna architektura znacznie uprościła wnętrza, eliminując elementy zdobnicze. Spowodowało to częste występowanie problemów wynikających z braku rozproszenia dźwięku, takich jak: echo, echo wielokrotne czy nierównomierny zanik energii akustycznej. Jednym z efektywnych kroków zaradczych jest stosowanie wyspecjalizowanych ustrojów rozpraszających dźwięk (il. 4). Ich użycie wynika z konkretnych problemów występujących w danym pomieszczeniu. Z tego powodu, w obliczeniach symulacyjnych dotyczących akustyki pomieszczeń niezbędna jest znajomość zarówno dźwiękochłonności ustrojów, jak i możliwości rozproszenia przez nie dźwięku.

Pomiar współczynnika rozproszenia s przeprowadzono na próbce, zaprojektowanej w oparciu o ciąg reszty kwadratowej o okresie  $N = 7$  (il. 5). Wyrazy ciągu  $s_n$  wyznaczono na podstawie zależności (1)

$$s_n = n^2 \bmod N \quad (1)$$

gdzie:

- $n$  – kolejne całkowite liczby nieujemne (0, 1, ...,  $n-1$ ),
- $N$  – długość okresu.

Głębokości studzienek  $d_n$  ustroju podaje zależność (2)

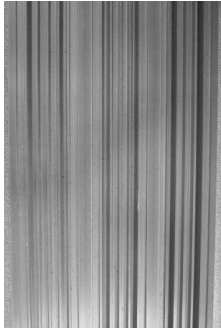
$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (2)$$

gdzie:

$\lambda_0$  – długość fali odpowiadająca dolnej granicy pasma  $f_0$ , w którym zachodzi rozproszenie dźwięku (rys. 6 i 7).

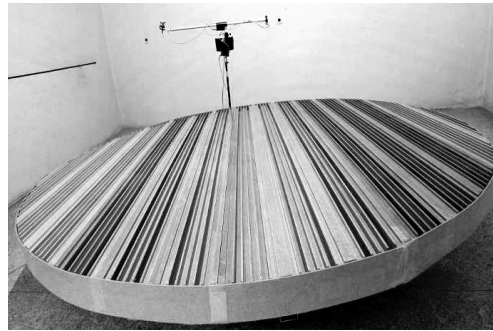
Od częstotliwości  $f_0$  zależy maksymalna głębokość ustroju. Górna granica pasma  $f_g$  jest natomiast uzależniona od szerokości studzienek, którą wyznacza się na podstawie zależności (3):

$$w = \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (3)$$



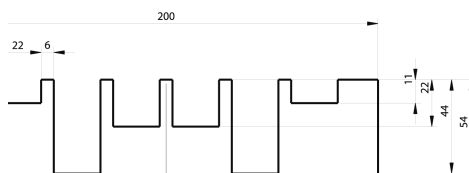
II. 4. Powierzchnia rozpraszacza QRD

III. 4. Surface of QRD diffuser



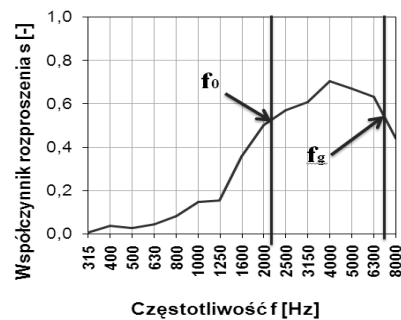
II. 5. Próbką rozpraszacza QRD w komorze pogłosowej

III. 5. Sample of QRD diffuser in reverberation chamber



II. 6. Przekrój badanego ustroju QRD

III. 6. Cross-section of the QRD diffuser

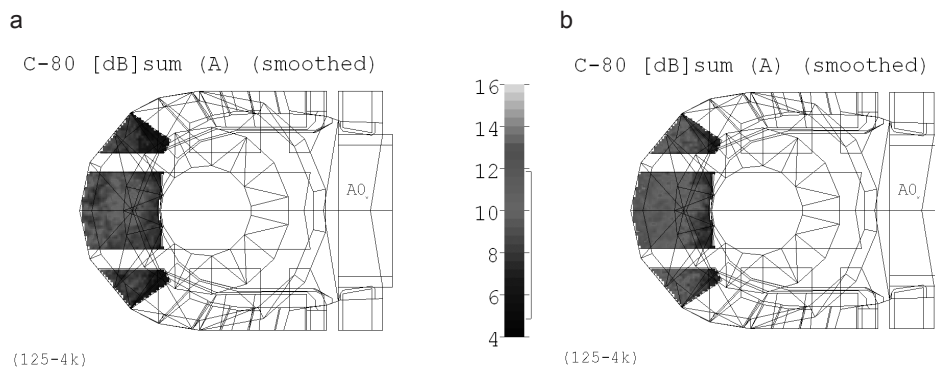


II. 7. Współczynnik rozproszenia dźwięku badanego ustroju QRD

III. 7. Sound dispersion coefficient of the QRD diffuser

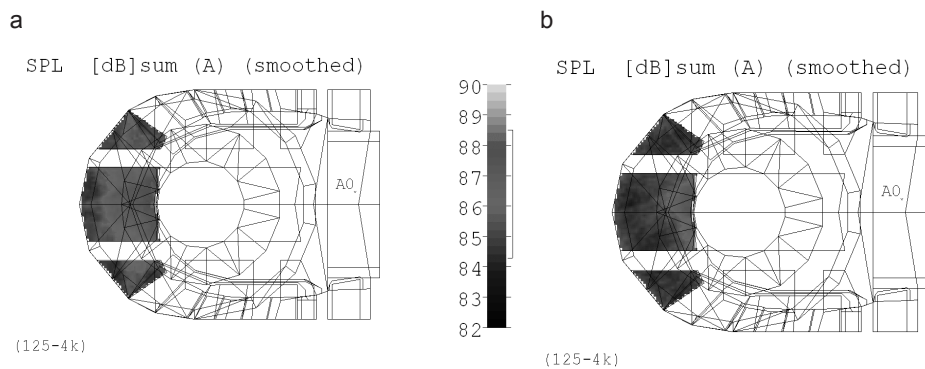
### 3. Symulacja komputerowa

Celem symulacji jest uzyskanie rozkładu wybranych parametrów akustycznych na części widowni usytuowanej pod balkonem. Wyniki symulacji, pokazujące przewidywane skutki zastosowania rozpraszaczy na tylnej ścianie parteru, przedstawiono na il. 8–13.



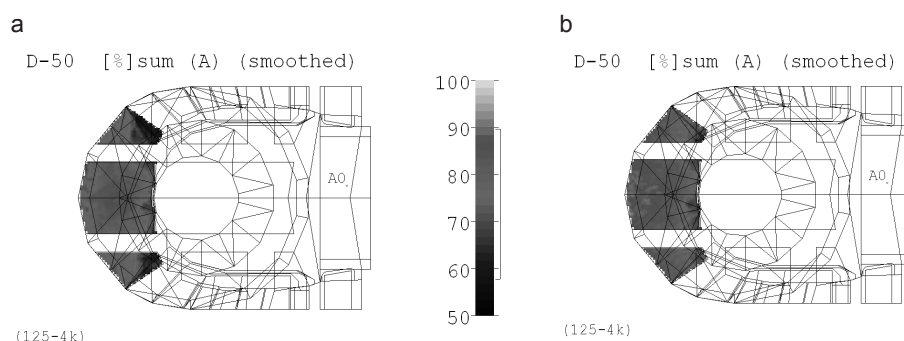
II. 8. Rozkład wartości  $C_{80}$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 8. Distribution of  $C_{80}$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)



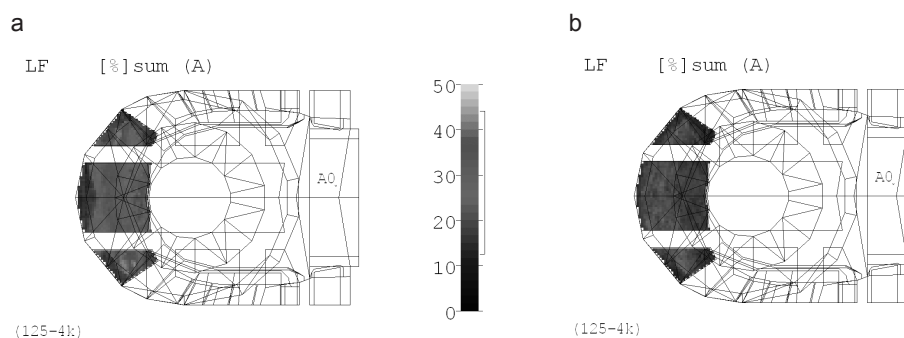
II. 9. Rozkład wartości  $SPL(A)$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 9. Distribution of  $SPL(A)$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)



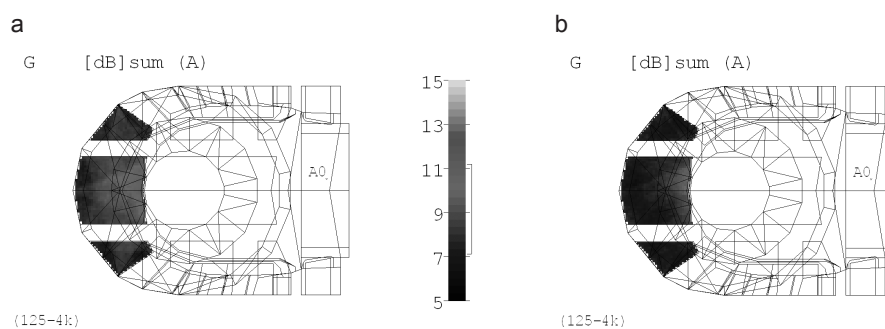
II. 10. Rozkład wartości  $D_{50}$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 10. Distribution of value  $D_{50}$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)



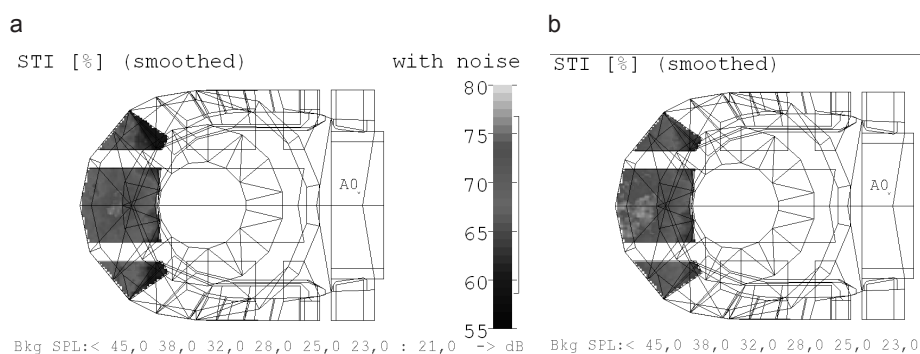
II. 11. Rozkład wartości  $LF$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 11. Distribution of value  $LF$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)



II. 12. Rozkład wartości  $G$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 12. Distribution of value  $G$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)



II. 13. Rozkład wartości  $STI$  pod balkonem na parterze sali: a – stan aktualny, b – po zamontowaniu rozpraszaczy (prognoza)

III. 13. Distribution of value  $STI$  under a balcony on a ground floor of a hall: a – present state, b – with QRD diffusers (prognosis)

#### 4. Wnioski

W artykule opisano próbę rozwiązania problemu często występującego w salach teatralnych, polegającego na gorszej akustyce we wnękach podbalkonowych. W ramach działań zaradczych przewiduje się pokrycie tylnej ściany wnęk rozpraszaczami QRD. Na użytek wykonywanej modernizacji sal, zaprojektowano taki rozpraszacz oraz zmierzono jego współczynnik rozproszenia dźwięku. Uzyskane dane oraz wyniki pomiarów wykonanych w sali Opery wykorzystano do utworzenia modelu komputerowego sali.

Przeprowadzone symulacje komputerowe wskazują na korzystną zmianę badanych parametrów akustycznych na obszarze wnęki podbalkonowej. Stwierdzono zwiększenie wartości parametru zrozumiałości mowy  $STI$  oraz parametru siły dźwięku  $G$ . W rezultacie oczekuje się poprawy warunków akustycznych w tym obszarze. W związku z zabytkowym statusem obiektu, przewiduje się podjęcie dodatkowych kroków, przystosowujących rozpraszacze do wymagań konserwatorskich.

#### Literatura

- [1] Kamisiński T., Kinasz R., Pilch A., Rubacha J., *Badania doświadczalne parametrów akustycznych sali widowiskowej opery we Lwowie*. XVI Konferencja Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej: Kraków–Zakopane, 30 marca – 03 kwietnia 2009.
- [2] Kamisiński T., Rubacha J., Pilch A., *Badania struktur rozpraszających dźwięk dla potrzeb adaptacji akustycznej wnętrz*. XVI Konferencja Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej: Kraków–Zakopane, 30 marca – 03 kwietnia 2009.

- [3] Kamisiński T., Kinasz R., Pilch A., Rubacha J., *Symulacja komputerowa parametrów akustycznych sali widowiskowej opery we Lwowie*. XVI Konferencja Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej: Kraków–Zakopane, 30 marca – 3 kwietnia 2009.
- [4] Kulowski A., *Akustyka Sal*. Gdańsk, Wydawnictwo PG, 2007.
- [5] Cox J., D'Antonio P., *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Spon Press, London and New York 2004.

Wykonano w ramach prac statutowych nr 11.130.859.