

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

## AKUSTYKA AULI POLITECHNIKI LWOWSKIEJ

### ACOUSTICS OF LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY ASSEMBLY HALL

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań akustycznych i symulacji komputerowych wybranych parametrów auli Politechniki Lwowskiej. Aula posiada nadmierną pogłosowość powodującą utrudnienia w użytkowaniu zgodnym z jej podstawową funkcją. Ze względu na ograniczone możliwości ingerencji w zabytkowy charakter wnętrza przeprowadzono analizę dostępnych środków umożliwiających poprawę zrozumiałości mowy. Przedstawiono kilka wariantów adaptacji akustycznej, pozwalającej na uzyskanie kompromisu pomiędzy akustyką a oryginalnym wystrojem wnętrza.

*Słowa kluczowe: akustyka, zrozumiałość mowy STI, czas pogłosu, Politechnika Lwowska*

#### Abstract

In paper results of acoustical measurements and numerical simulation of Lviv Polytechnic National University Assembly Hall are presented. Too long reverberation time impedes using it according to its main function. Due to limited possibilities of changes of historical interior's character, analysis of available methods of speech intelligibility improvements were made. Some variants of acoustic treatment is presented, that allow to achieve a compromise between good acoustics and original interior's arrangement.

*Keywords: acoustics, speech intelligibility sti, reverberation time, Lviv Polytechnic National University*

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

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

## 1. Wstęp

Gmach główny Politechniki Lwowskiej, w którym znajduje się sala Senatu został wybudowany w 1877 r. Aula ma kształt prostopadłościenny o wymiarach 22×12×13m. Objętość wynosi około 3500 m<sup>3</sup>. Liczba miejsc siedzących to ok. 160 (70 miejsc na krzesłach przy stołach, pozostałe miejsca na wolno stojących krzesłach).



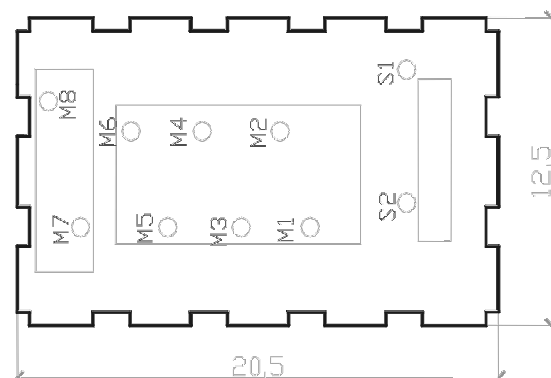
II. 1. Widok auli Politechniki Lwowskiej

III. 1. Assembly Hall's interior

Wystrój wnętrza ma unikatowy, historyczny charakter, przejawiający się bogatym zdobnictwem ścian i sufitu (il. 1). Ściany pomieszczenia są tynkowane, z licznymi detalami architektonicznymi, sufit wykonany w postaci bardzo bogato rzeźbionych kasetonów, na podłodze znajduje się parkiet, częściowo pokryty wykładziną dywanową. Na ścianach bocznych powyżej gzymsu znajdują się oryginalne obrazy autorstwa Jana Matejki ufundowane dla Politechniki przez cesarza Franciszka Józefa I. Krzesła są drewniane z rzeźbionymi elementami, a siedziska i oparcia są tapicerowane skórą.

## 2. Pomiar i analiza wybranych parametrów akustycznych

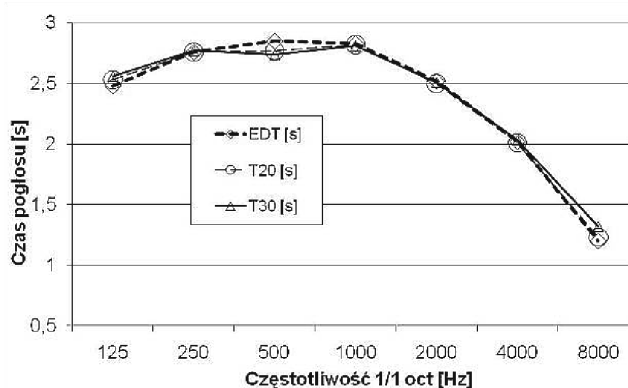
Pomiary parametrów akustycznych pomieszczenia wykonane zostały na podstawie procedury podanej w normie PN-EN ISO 3382-1:2009 [1]. Tor pomiarowy złożony był z mikrofonów pomiarowych, karty dźwiękowej, komputera z oprogramowaniem pomiarowym Dirac 4.1 oraz wszechkierunkowego źródła dźwięku. Parametry akustyczne wnętrza wyznaczono na podstawie zarejestrowania odpowiedzi impulsowych w 15 punktach pomiarowych równomiernie rozmieszczonych na widowni (il. 2). Na podstawie wyznaczonych odpowiedzi impulsowych obliczono parametry akustyczne wnętrza. Dla auli, jako dla wnętrza przeznaczonego do przekazu słownego, najważniejsze są parametry odpowiedzialne za zrozumiałość mowy, dlatego też do analizy wybrano wskaźnik STI (wskaźnik zrozumiałości mowy – *speech transmission index*) oraz czas pogłosu pomieszczenia,  $T_{20}$  jako podstawowy parametr akustyczny każdego wnętrza. Wskaźnik STI przyjmuje wartości z zakresu 0–1, gdzie wysokie wartości oznaczają wysoką zrozumiałość mowy.



II. 2. Szkic pomieszczenia z rozmieszczeniem punktów pomiarowych

III. 2. Room's sketch with measurements points

Uzyskany z badań średni czas pogłosu auli bez publiczności dla częstotliwości średnich (0,5–1 kHz) wynosi  $T_{20} = 2,8$  s. W przypadku auli wartość stosunku objętości do liczby miejsc wynosi  $22 \text{ m}^3/\text{osobę}$ , gdzie zaleca się dla sal audytoryjnych  $4\text{--}7 \text{ m}^3/\text{osobę}$ . Zbyt duża kubatura oraz zbyt niska chłonność akustyczna powierzchni oraz wyposażenia skutkuje nadmierną pogłosowością sali. Charakterystykę częstotliwościową czasu pogłosu przedstawiono na (il. 3).



II. 3. Czas pogłosu w funkcji częstotliwości zmierzony w auli Politechniki Lwowskiej

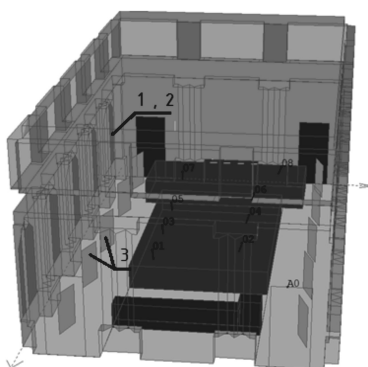
III. 3. Mean values of reverberation time in the Lviv Polytechnic Hall

Uzyskane wyniki badań wskazują na złą zrozumiałość mowy dla większości punktów pomiarowych ( $STI < 0,45$ ). Tylko dla punktów znajdujących się najbliżej źródła dźwięku zrozumiałość mowy można ocenić jako dostateczną ( $STI > 0,45$ ). Jednak należy zwrócić uwagę, że pomiary przeprowadzono w sali pustej, tj. bez publiczności. W celu oszacowania parametrów akustycznych auli wypełnionej ludźmi zbudowano model akustyczny sali w programie CATT-Acoustic. Przeprowadzone symulacje komputerowe dla sali z zapelnioną widownią wykazały, że czas pogłosu wynosi  $1,93$  s, co również znacznie przekracza wartości zalecane. Natomiast wartości wskaźnika transmisji mowy STI zawierają się w prze-

dziale 0,48–0,53, co oznacza, że zrozumiałość mowy jest na poziomie dostatecznym. Za Rettingerem [3] przyjęto, że dla objętości pomieszczenia  $V = 3500 \text{ m}^3$  o funkcji audytoryjnej z wypełnioną widownią czas pogłosu  $T_{(500-1k)} = 0,9 \text{ s}$ .

### 3. Badania symulacyjne

Przeprowadzona analiza miała na celu zbadanie możliwości obniżenia czasu pogłosu oraz poprawy zrozumiałości mowy w auli. Ze względu na zabytkowy charakter obiektu nie jest możliwe zastosowanie typowych materiałów pochłaniających dźwięk, które nie pasowały stylistycznie do wystroju wnętrza. W efekcie wybrano rozwiązania jak najmniej ingerujące we wnętrze sali (il. 4).



- II. 4. Rozmieszczenie materiałów wybranych do adaptacji akustycznej auli: 1 – podwójne rolety, 2 – folia mikroperforowana, 3 – postery z folią mikroperforowaną
- III. 4. Acoustical treatment arrangement: 1 – double acoustics banner, 2 – micro-perforated foil, 3 – stands with micro-perforated foil

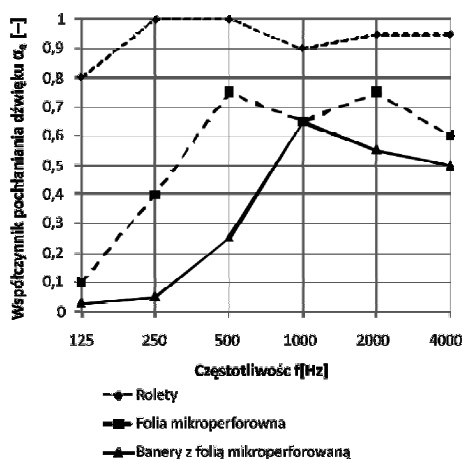
Do symulacji wybrano pięć wariantów adaptacji auli (tab. 1). Symulacje parametrów akustycznych auli, wykonano dla kolejnych wariantów dla sali z publicznością, wprowadzając do modelu odpowiednie współczynniki pochłaniania dźwięku materiałów przedstawione na il. 5. Źródło dźwięku usytuowano w miejscu mówcy przy pulpicie.

Tabela 1

#### Opis proponowanych materiałów użytych w symulacji komputerowej w poszczególnych wariantach

Wariant	Opis materiału	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]
Wariant 1	– podwójna roleta w oknie (dwie warstwy weluru w odległości 75mm między sobą)	50
Wariant 2	– podwójna folia mikroperforowana w oknie w odległości $A = 100 \text{ mm}$ (dwie folie w odległości $B = 30 \text{ mm}$ między sobą)	50
Wariant 3	– postery z folią perforowaną	45
Wariant 4	– podwójna roleta w oknie – postery z folią perforowaną	95
Wariant 5	– podwójna folia mikroperforowana w oknie – postery z folią perforowaną	95

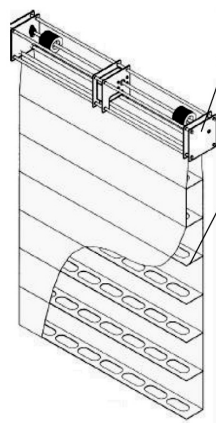
Ze względu na ograniczoną powierzchnię, na której można wykonać adaptację akustyczną, wybrano materiały charakteryzujące się możliwie wysokimi współczynnikami pochłaniania dźwięku, co pozwoliłoby na obniżenie wartości czasu pogłosu. Wartości współczynników pochłaniania dobrano na podstawie danych podanych przez producentów oraz danych dostępnych w literaturze.



II. 5. Współczynniki pochłaniania zastosowanych elementów adaptacji auli

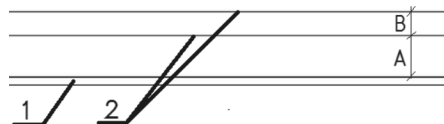
III. 5. Absorption coefficients of structures used in acoustical treatment

Do adaptacji akustycznej powierzchni okien auli zaproponowano dwa warianty materiałów. Opuszczane rolety, zamontowane nad oknami, wykonane z dwóch warstw tkaniny welurowej o gęstości  $0,54 \text{ kg/m}^2$  w odległości  $75 \text{ mm}$  między sobą (il. 6) oraz dwie warstwy folii mikroperforowanej zamontowanej na konstrukcji aluminiowej przytwierdzonej do ramy w odległości od siebie  $B = 30 \text{ mm}$  i w odległości  $A = 100 \text{ mm}$  od szyby. Grubość zastosowanej folii wynosi  $0,1 \text{ mm}$ , natomiast średnica wykonanych w niej otworów  $0,2 \text{ mm}$  (il. 7).



II. 6. Roleta z podwójnej warstwy weluru

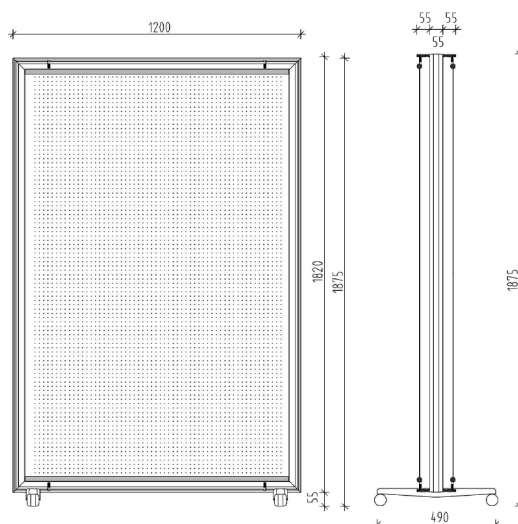
III. 6. Double velour banner



II. 7. Podwójna folia mikroperforowana zamontowana w oknie: 1 – szyba,  
2 – folia mikroperforowana

III. 7. Double micro-perforated foil mounted on the window: 1 – glass,  
2 – micro-perforated foil

Jako dodatkowy materiał dźwiękochłonny zastosowano postery wykonane z szyby zamontowanej w ramie aluminiowej na kółkach. Wymiary zastosowanych posterów wynoszą  $1820 \times 1200$  mm. Po obu stronach szyby, w odległości 55 mm od niej zamontowano pojedynczą warstwę folii mikroperforowanej o grubości 0,1 mm i średnicy otworów 0,2 mm (il. 8).

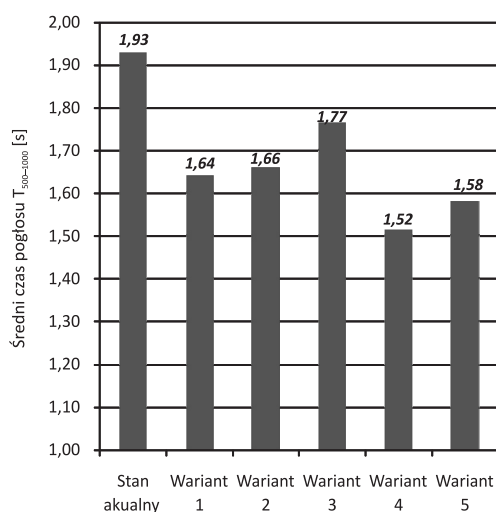


II. 8. Poster z urządzeniem dźwiękochłonnym z folii mikroperforowanej

III. 8. Free-standing acoustic panel with micro-perforated foil

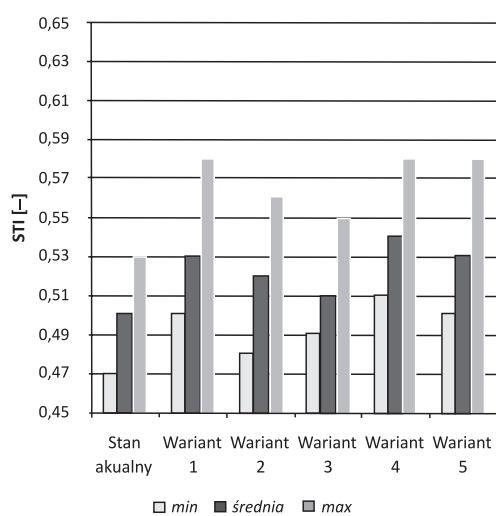
#### 4. Wyniki symulacji

Przeprowadzone symulacje pozwoliły na analizę wybranych parametrów akustycznych auli, takich jak czas pogłosu  $T_{20}$  oraz wskaźnik transmisji mowy STI odpowiedzialny za zrozumiałość przekazów słownych. Na il. 9 przedstawiono średnie wartości czasu pogłosu uzyskane dla poszczególnych wariantów. Najniższe średnie wartości czasu pogłosu dla częstotliwości 500 i 1000 Hz, odpowiednio 1,52 i 1,58 s, uzyskano dla równoczesnego zastosowania materiału dźwiękochłonnego w oknach oraz posterów z folią mikroperforowaną (wariant 4 i 5). Dla wariantów, w których materiał zastosowano tylko w jednym miejscu najniższe wartości czasu pogłosu uzyskano dla podwójnych rolet zamontowanych w oknach 1,64 s (wariant 1).



II. 9. Średnie wartości czasu pogłosu (500–1000 Hz) dla analizowanych wariantów

III. 9. Mean reverberation times (500–1000 Hz) for treatments variants



II. 10. Zestawienie wartości wskaźnika transmisji mowy STI w sali Senatu dla analizowanych wariantów adaptacji akustycznej – symulacja w programie CATT-Acoustic

III. 10. STI values for investigated Assembly Hall for analyzed acoustical treatment variants – CATT-Acoustic simulation

Wyniki symulacji obliczeniowej wskaźnika STI (il. 10) pokazują, że jego najwyższe wartości uzyskano po zastosowaniu rolet oraz posterów (wariant 4). Wartość średnia wskaźnika STI wyniosła 0,54. Natomiast dla wariantu 1 z samymi roletami oraz dla wariantu 5 z mikroperforacją w oknie i posterami otrzymano zbliżone wyniki. W obu wariantach otrzymano zbliżone wartości średnie  $STI = 0,53$  oraz przedział zmienności wskaźnika  $STI_{min} = 0,50$ ,  $STI_{max} = 0,58$ .

## 5. Wnioski

Celem przeprowadzonych badań była analiza możliwości poprawy zrozumiałości mowy w sali Senatu Politechniki Lwowskiej, gdzie stwierdzono nadmierną pogłosowość. Podjęto próbę obniżenia czasu pogłosu wnętrza poprzez wprowadzenie dodatkowej chłonności akustycznej. Ze względu na historyczny charakter wnętrza analizie poddano wybrane warianty adaptacji akustycznej auli nieingerujące w strukturę zabytkowego wystroju.

Wyniki symulacji wskaźnika transmisji mowy STI pokazują, że zastosowanie w oknach, na wysokości słuchaczy, materiałów charakteryzujących się wysokim współczynnikiem pochłaniania dźwięku skutecznie eliminuje odbicia dźwięku docierające do słuchaczy z boku i przekłada się na podniesienie zrozumiałości mowy. Średnie wartości wskaźnika STI dla wariantów 1 i 2 (tab. 1) zawierają się w przedziale 0,52–0,53. Wprowadzenie dodatkowej chłonności akustycznej w postaci posterów z folią mikroperforowaną przekłada się na niewielki wzrost STI do wartości z zakresu 0,53–0,54.

Uzyskane wyniki symulacji wykazały, że dla wariantów, w których zastosowano materiał dźwiękochłonny tylko w oknie w postaci rolet uzyskano czas pogłosu  $T_{sr} = 1,64$  s, natomiast tylko dla posterów  $T_{sr} = 1,77$  s. Dla wariantów z materiałem dźwiękochłonnym zamontowanym zarówno w oknie, jak i w postaci posterów z folią można uzyskać obniżenie średniego czasu pogłosu do wartości z przedziału 1,52–1,58 s.

Dla wariantów 1 i 5 (tab. 1) uzyskano podobne wartości wskaźnika STI = 0,53. Zastosowanie rolet w oknach o powierzchni 50m<sup>2</sup> (wariant 1) pozwala na uzyskanie czasu pogłosu  $T_{sr} = 1,64$  s, natomiast zastosowanie mikroperforacji w oknach i na posterach (wariant 5) o łącznej powierzchni 95 m<sup>2</sup>, przekłada się na wartości czasu pogłosu  $T_{sr} = 1,58$  s.

Ze względu na reprezentacyjny i historyczny charakter auli Politechniki Lwowskiej udział wybrzmiewania dźwięku jest istotnym czynnikiem przy tworzeniu klimatu dostojności przynależnej temu miejscu. Można więc zauważyć, że dalsze obniżanie czasu pogłosu do wartości zalecanych przez literaturę nie jest jednoznacznie uzasadnione.

## Literatura

- [1] PN-EN ISO 3382-1:2009 *Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne (oryg.)*.
- [2] K a m i s i ń s k i T., *Acoustic simulation and experimental studies of theatres and concert halls*, Acta Physica Polonica A, vol. 117, Polska Akademia Nauk, Instytut Fizyki, Warszawa 2010.
- [3] K u l o w s k i A., *Akustyka Sal*, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2007.