

PROBLEMATYKA POGŁOSOWOŚCI W SALI DYDAKTYCZNEJ

1. WSTĘP

Zagadnienie akustyki w salach dydaktycznych jest wciąż niedoceniane w projektowaniu architektonicznym. Większość sal lekcyjnych nie ma żadnej adaptacji akustycznej, w wyniku czego występuje zbyt długi czas pogłosu. Nieodpowiednia akustyka takich sal powoduje rozmaite problemy, gdyż pogłosowość wpływa zarówno na komfort wykładowcy, jak i słuchaczy.

W literaturze polskiej i obcojęzycznej opisywane są różne aspekty tej istotnej tematyki. W artykule „Wpływ właściwości akustycznych sal lekcyjnych na poziom ciśnienia akustycznego mowy nauczycieli” [9], przedstawiono wyniki badań akustycznych w 21 pomieszczeniach lekcyjnych. Badania przeprowadzono w celu uzyskania informacji o wpływie właściwości akustycznych sal lekcyjnych na wysiłek głosowy nauczycieli. Wykazano, że 95% sal nie spełniało wymagań normowych. Badania wskazały także, że tło akustyczne związane z aktywnością uczniów wpływa bezpośrednio na wysiłek głosowy nauczyciela. Podano, że jedną z możliwości poprawy warunków pracy głosem jest wykonanie adaptacji akustycznej pomieszczenia. Z kolei w pracy „Wyniki badań wpływu adaptacji akustycznych na jakość komunikacji werbalnej” [6] omówiono wpływ adaptacji akustycznych sal lekcyjnych na zrozumiałość mowy. Opisano i oceniono adaptację akustyczną w dwóch salach lekcyjnych. W publikacji „Ocena właściwości akustycznych pomieszczeń pracy nauczycieli na przykładzie wybranych szkół podstawowych” [11] przedstawiono wyniki badań właściwości akustycznych pomieszczeń przeprowadzonych w 89 salach lekcyjnych w czterech szkołach podstawowych. Badano czas pogłosu RT, clarity C50 oraz wskaźnik zrozumiałości mowy STI. Wyniki badań wykazały niekorzystne warunki akustyczne w pomieszczeniach będących miejscem pracy nauczycieli. Wymogi dla czasu pogłosu spełniło tylko 1% pomieszczeń. Dla wskaźnika STI 57% klas spełniło kryteria brytyjskie, natomiast żadna nie spełniła kryteriów normy fińskiej.

Z licznych publikacji anglojęzycznych można wymienić pracę, „Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms” [4] w której opisano pomiary akustyczne przeprowadzone w salach wykładowych University of British Columbia (UBC). Część testów przeprowadzono w salach zajęciowych przez studentów, co mogło poprawić parametry akustyczne sal. Stwierdzono, że w większości przypadków czas pogłosu jest zbyt długi, jak również występowała zbyt duża głośność systemów wentylacyjnych. Z kolei w publikacji „Reverberation time in classrooms – Comparison of regulations and classification criteria in the

Nordic countries" [12], przedstawiono różnice w klasyfikacji sal lekcyjnych w pięciu krajach skandynawskich. Pokazano, że zalecany czas pogłosu dla sal lekcyjnych podawany w regulacjach normowych i wytycznych projektowych jest coraz krótszy. W artykule „Ten ways to provide a high-quality acoustical environment in schools” [13] opisano natomiast impulsowe pomiary akustyczne w 56 salach lekcyjnych na Florydzie. Przeanalizowano modele komputerowe ośmiu sal lekcyjnych. W pracy zawarto również wskazówki do projektowania sal. Artykuł „Global index of the acoustic quality of classrooms” [10] prezentuje metodę oceny jakości akustycznej sal lekcyjnych, bazującej na globalnym wskaźniku jakości akustycznej. Zaprezentowano wyniki szacowania jakości akustycznej dla wybranych sal. W pracy „Predicting reverberation times in a simulated classroom” [2] zaprezentowano natomiast przeprowadzone symulacje czasu pogłosu w salach lekcyjnych za pomocą programów RAYNOISE 3.0 i ODEON 2.6. Wyniki porównano z obliczeniami analitycznymi i wynikami eksperymentalnymi. Problematykę komfortu akustycznego dla nauczycieli podjęto w pracy „Classroom acoustics design guidelines based on the optimization of speaker conditions” [7]. Z kolei publikacja „A procedure to improve speech intelligibility in university classrooms” [1] dotyczy wyznaczania optymalnego czasu pogłosu w celu uzyskania dobrej zrozumiałości mowy i optymalnej lokalizacji materiału pochtaniającego w zależności od poziomu tła akustycznego. Numeryczne symulacje przeprowadzono dla dwóch sal wykładowych.

2. NOWA NORMA I ZALECENIA

W roku 2015 została opublikowana nowa norma polska PN-B-02151-4 „Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach”. We wprowadzeniu do normy „Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań” można przeczytać, że stosowanie wymagań normy w odniesieniu do określonych pomieszczeń ma na celu „zmniejszenie hałasu w pomieszczeniu poprzez ograniczenie jego składowej, jaką jest hałas pogłosowy, zapewnienie zrozumiałości mowy umożliwiające właściwe użytkowanie pomieszczeń przeznaczonych do komunikacji słownej.” Podane założenia w pełni odpowiadają problematyce akustycznej dotyczącej sal lekcyjnych. W normie podane są zalecenia odnośnie do wartości czasu pogłosu T i wskaźnika transmisji mowy STI zależnie od kubatury sali lekcyjnej. Czas pogłosu T jest podstawowym parametrem akustycznym, należy jednak pamiętać, co podane jest w normie, że „Czas pogłosu, T , nie jest jedynym czynnikiem zapewniającym odpowiednie warunki akustyczne w pomieszczeniach przeznaczonych do komunikacji słownej. Projektując tego rodzaju pomieszczenia należy uwzględnić również:

- a) kształt, wymiary i kubaturę pomieszczenia;
- b) rozmieszczenie powierzchni i ustrojów o właściwościach pochtaniających, odbijających i rozpraszających dźwięk;
- c) ograniczenie poziomu tła akustycznego w pomieszczeniu”.

Podane w normie wytyczne pozwalają za pomocą wzoru na czas pogłosu oszacować pogłos w pomieszczeniu, jak również wprowadzić korektę akustyczną poprzez dobór odpowiedniej ilości materiałów pochtaniających. Jednakże za pomocą wzoru można jedynie oszacować czas pogłosu w pomieszczeniu, na-

tomiast na akustykę mają również wpływ sposób rozmieszczenia materiałów i ukształtowanie sali. Tego oczywiście za pomocą wzoru podanego w Normie nie można uwzględnić. Stąd potrzebna jest wiedza, jak należy rozmieszczać materiały pochłaniające w pomieszczeniu i w jaki sposób kształtować architekturę sali.

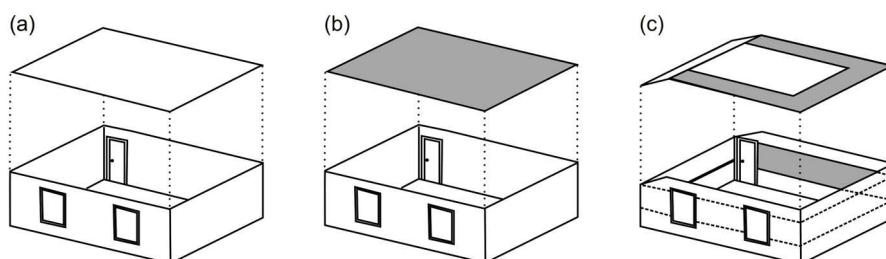
3. W POSZUKIWANIU DOBREJ AKUSTYKI

Akustyka w sali lekcyjnej powinna umożliwić zrozumienie przekazu słownego, jak również zapewnić odpowiednie warunki dla wykładowcy, tak aby nie nadwyręzał aparatu głosowego.

W sali lekcyjnej, która nie ma adaptacji akustycznej, może pojawić się szereg problemów akustycznych. Należą do nich zbyt długi czas pogłosu, który powoduje powstawanie uciążliwego hałasu pogłosowego, i trudności ze zrozumieniem przekazu słownego, szczególnie w ostatnich rzędach. Dla studentów efektem takiej akustyki są przede wszystkim gorsze wyniki w nauce, zmęczenie wynikające z nadmiernego wyężdżania uwagi, zmęczenie hałasem, utrudnione skupienie, rozdrażnienie. Dla osoby prowadzącej zajęcia będzie to natomiast zmęczenie aparatu głosowego i podobnie jak w przypadku studentów zmęczenie hałasem oraz podenerwowanie.

W publikacji [14] podano, jak w optymalny sposób kształtować architekturę sali lekcyjnej i jak rozmieszczać materiały pochłaniające dźwięk. Na rysunku 1 przedstawiono odpowiednio:

- salę bez materiałów pochłaniających dźwięk, sufit odbijający dźwięk,
- salę z sufitem pochłaniającym dźwięk,
- salę z sufitem częściowo pochłaniającym, a częściowo odbijającym dźwięk, dodatkowo na ścianach znajduje się pas materiału pochłaniającego dźwięk.



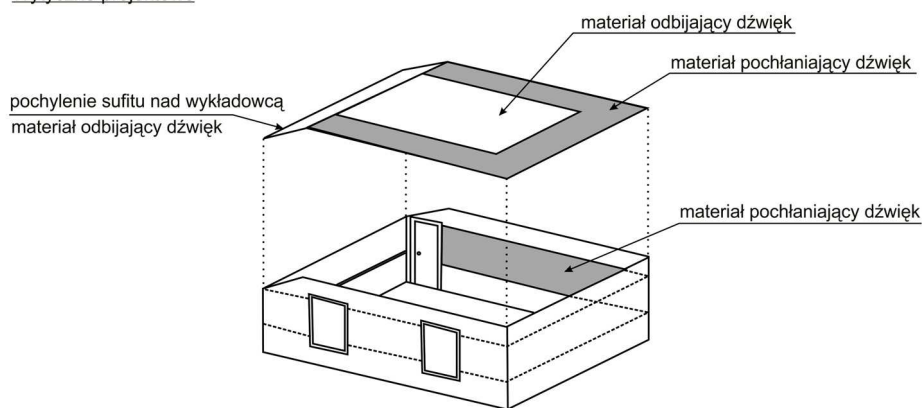
Rys. 1. Przykłady różnych aranżacji sal lekcyjnych: (a) sala z sufitem odbijającym dźwięk, (b) sala z sufitem pochłaniającym dźwięk, (c) sala z sufitem częściowo odbijającym i częściowo pochłaniającym dźwięk. (opracowanie własne na podstawie [14])

Fig. 1. Examples of various classroom layouts: (a) a room with a sound reflecting ceiling, (b) a room with a sound absorbing ceiling, (c) a room with a ceiling partially reflecting and partially absorbing sound (own study on the basis of [14])

Sala (a) stanowi występującą powszechnie w Polsce salę lekcyjną, która nie ma żadnej aranżacji akustycznej. W zależności od kubatury takiej sali i od tego czy we wnętrzu znajdują się materiały pochłaniające, takie jak np. gazetka ścienna, meble, zastony, problemy akustyczne będą występować z różnym natężeniem. Z kolei sala (b) stanowi przykład popularnej aranżacji akustycznej

w postaci pochłaniającego dźwięk sufitu. Przy takim rozwiązaniu komfort akustyczny bardzo wzrośnie, można z powodzeniem uzyskać wartości parametrów dla sal lekcyjnych zalecane w normie. Jednak za optymalne uznane jest rozwiązanie (c). Na podstawie rysunku 1c wykonano szczegółowy rysunek przedstawiający zalecany sposób ukształtowania sufitu i rozkład materiałów pochłaniających w sali (rys. 2). Zgodnie z tymi wytycznymi na suficie materiał silnie pochłaniający dźwięk należy umieścić w kształcie litery „U”. Środek sufitu powinien być pokryty materiałem odbijającym dźwięk. Sufit nad wykładowcą powinien być ponadto pochylony i pokryty materiałem o małym współczynniku pochłaniania dźwięku. Takie rozwiązanie zapewnia wzmocnienie głosu wykładowcy. Na ścianach zaleca się zastosowanie szerokiego pasa z materiałów pochłaniających dźwięk. Pas ten należy ułożyć na trzech ścianach, pozostawiając ścianę za wykładowcą odbijającą dźwięk. Pozostawienie ściany odbijającej dodatkowo wzmacnia głos wykładowcy. Na podłodze najlepiej zastosować natomiast wykładzinę akustyczną tłumiącą dźwięki uderzeniowe. Takie rozwiązanie architektoniczne zapewnia dobrą akustykę wnętrza. Poza tym jest to zgodne z ogólnymi wytycznymi akustycznymi, gdyż zaleca się, aby w pobliżu źródła dźwięku umieszczać materiał odbijający dźwięk. W miarę oddalania się od źródła użyte materiały powinny mieć natomiast większy współczynnik pochłaniania dźwięku [5]. Odpowiednia ilość materiałów pochłaniających pozwala uzyskać właściwy czas pogłosu, natomiast sposób ich rozmieszczenia wpływa na komfort wykładowcy, jak również sprawia, że wykładowca jest lepiej słyszalny. Jest szczególnie ważne, żeby w projektowaniu akustyki sali dydaktycznej nie zmierzać tylko do zmniejszenia nadmiernej pogłosowości, ale również zapewnić korzystne odbicia wzmacniające głos wykładowcy. Jak podano w publikacji [3], nadmierne wysiłanie głosu przez nauczycieli nie wynika tylko z wysokiego poziomu tła akustycznego, ale również z braku powierzchni odbijających, które zapewniłyby korzystne odbicia i tym samym umożliwiły lepszą słyszalność nauczyciela.

Wytyczne projektowe



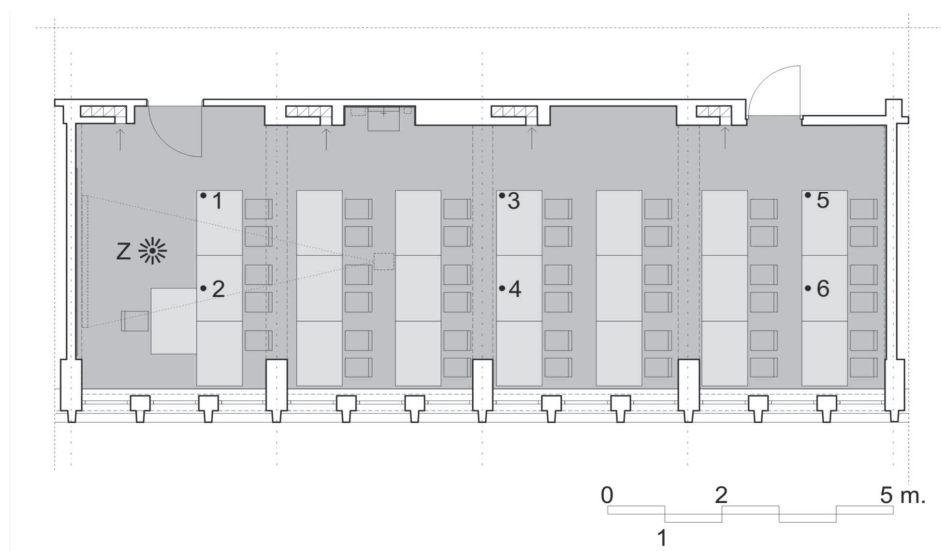
Rys. 2. Sala lekcyjna z optymalną aranżacją akustyczną (opracowanie własne na podstawie [14])

Fig. 2. Classroom with optimal acoustic layout (own study on the basis of [14])

4. BADANIA AKUSTYCZNE

Prowadzono badania akustyczne z zastosowaniem programu DIRAC wraz z kartą dźwiękową Brüel & Kjær ZE-0948 USB. W celu otrzymania odpowiedzi impulsowej pomieszczenia zastosowano strzał z pistoletu. Źródło dźwięku znajdowało się w miejscu, gdzie zwyczajowo znajduje się wykładowca, tj. w odległości 1,2 m od ściany. Przyjęto 6 punktów pomiarowych. Rzut sali z położeniem źródła dźwięku i punktów pomiarowych pokazano na rysunku 3.

Obiekt, w którym znajduje się badana sala, to siedmiokondygnacyjny, podpiwniczony budynek w konstrukcji szkieletowej żelbetowej, wybudowany na podstawie projektu wykonanego w roku 1958 w Przedsiębiorstwie Projektowania i Dostaw Inwestycyjnych w Warszawie jako budynek administracyjny dla Fabryki Łożysk Toczących w Poznaniu. Struktura w układzie trójtaktowym, oparta na module 3,6 x 4,8 m, z wewnętrznym traktem komunikacji o module 2,4 x 3,6 m. Obiekt miał jedną klatkę schodową i dwie windy osobowe. Budynek adaptowano dla potrzeb Politechniki Poznańskiej na podstawie projektu wykonanego przez prof. Mariana Fikusa w maju 1999 roku. Dobudowano wówczas moduł (3,6 x 13,6 m) zawierający klatkę schodową wraz z blokiem pomieszczeń sanitarnych w północnym szczycie budynku.



Rys. 3. Rzut sali dydaktycznej z aranżacją meblową wraz z pokazaniem punktów pomiarowych i źródła dźwięku (opracowanie własne)

Fig. 3. View of the seminar room with furniture arrangement, with marked measuring points and the sound source (own study)

Sala będąca przedmiotem badań znajduje się na drugim piętrze w starszej części budynku. Pomieszczenie to ma wysokość 3,0 m, a jego powierzchnia wynosi 68,9 m². Ściany szczytowe sali wykonano z cegły dziurawki gr. 12 cm, obudowane płytami gipsowo-kartonowymi. Podobnie wykończone są ściany od strony korytarza. Wykończenie sufitu stanowi tynk cementowo-wapienny z gła-



Rys. 4. Sala dydaktyczna – widok od strony tablicy (fot. autor)

Fig. 4. Seminar room – a view from the perspective of the blackboard (photo by author)



Rys. 5. Sala dydaktyczna pusta – widok z końca sali (fot. autor)

Fig. 5. Seminar room empty – a view from the end of the room (photo by author)



Rys. 6. Sala dydaktyczna zapętniona – widok z końca sali (fot. autor)

Fig. 6. Seminar room with students – a view from the end of the room (photo by author)

dzią gipsową, malowany farbą emulsyjną. Posadzka wyłożona jest wykładziną PCV, wywiniętą na ściany do wysokości 10 cm. Wyposażenie meblowe pomieszczenia dydaktycznego to stoły o wymiarach 80 x 120 cm o wysokości 73,5 cm (blat z płyty meblowej gr. 3 cm na konstrukcji stalowej z rur 25 x 25 mm), ustawione w trzech rzędach oraz krzesła o wymiarach siedziska 36 x 41 cm (sklejka gięta gr. 8 mm na konstrukcji z rur stalowych 20 x 20 mm).

Przeprowadzono badania w sali pustej i w obecności 28 osób (rys. 4-6). Pomiary były wykonane w okresie jesienno-zimowym (na początku grudnia), w związku z tym na oparciach krzeseł znajdowała się wierzchnia odzież.

Na rysunku 7 pokazano wykres czasu pogłosu w funkcji częstotliwości. Można zauważyć, że sala zapętniona osiąga znacznie mniejsze wartości czasu pogłosu. Wg normy PN-B-02151-4 wymagany średni czas pogłosu dla sali lekcyjnej pustej o kubaturze do 250 m³ powinien wynosić nie więcej niż 0,6 s. Kubatura badanej sali wynosi około 207 m³, natomiast średni czas pogłosu wynosi 1,6 s. Jest to wartość wielokrotnie przekroczona w stosunku do zalecanej. Wyniki potwierdzają subiektywne odczucia wyraźnie słyszalnego hałasu pogłosowego. Tymczasem średni czas pogłosu dla sali zapętnionej wynosi 0,8 s. Zatem pomimo zapętnienia sali osobami wraz z pochłaniającą dźwięk odzieżą wierzchnią czas pogłosu jest przekroczony w stosunku do zaleceń dla sali pustej.

5. KOREKTA AKUSTYCZNA NA PODSTAWIE NORMY

Czas pogłosu w sali dydaktycznej znacznie przekracza wartości zalecane w normie, dlatego konieczna jest korekta akustyczna. Na podstawie wytycznych podanych w normie przeprowadzono obliczenia czasu pogłosu i otrzymano wynik zbliżony do uzyskanego w pomiarach. Obliczona chłonność akustyczna pomieszczenia wynosi około 22 m². Po korekcie akustycznej chłonność akustyczna pomieszczenia powinna wynosić około 33,5 m². Przyjęto, że korektę akustyczną będą stanowiły płyty sufitowe i ścienne o średnim

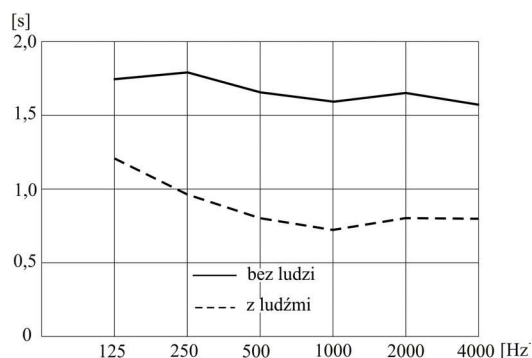
współczynnika pochłaniania $\alpha = 0,8$. Na podstawie wzorów na czas pogłosu obliczono potrzebną powierzchnię, która musi zostać pokryta wspomnianymi płytami. Zgodnie z tymi obliczeniami, aby zredukować czas pogłosu z $RT = 1,6$ s do wymaganego $RT = 0,6$ s, powierzchnia pokryta przez płyty powinna wynosić około 46 m².

6. WNIOSKI

Zalecany w normie PN-B-02151-4 czas pogłosu dla sal lekcyjnych o kubaturze wynoszącej do 250 m³ wynosi 0,6 s. W stosunku do wymogów akustycznych np. w krajach skandynawskich wymagany pogłos nie jest aż tak restrykcyjny (spośród krajów skandynawskich najsurowsze wymagania ma Norwegia, sale lekcyjne klasy A powinny mieć czas pogłosu nie większy niż 0,3 s [12]). Z przedstawionych badań wynika, że dla przeciętnej sali mogącej pomieścić około 35 osób, wykończonej tradycyjnymi materiałami czas pogłosu jest znacznie przekroczony. Korzystając ze wzorów na czas pogłosu, można obliczyć niezbędną powierzchnię, która powinna zostać pokryta odpowiednim materiałem dźwiękochłonnym. Po ilościowym określeniu potrzebnego materiału należy odpowiednio rozmieścić materiał na ścianach i suficie zgodnie z wytycznymi, dla projektowania sal lekcyjnych, które są dostępne w specjalistycznej literaturze.

LITERATURA

- [1] Astolfi A., Perino M., Piccaluga A., 2001. A procedure to improve speech intelligibility in university classrooms. ICA Rome.
- [2] Bristafa S.R., Bradley J., 2000. Predicting reverberation times in a simulated classroom. J. Acoust. Soc. Am. 108(4), 1721-1731.
- [3] Brunskog J., Gade A.C., Paya-Ballester G., Reig-Calbo L., 2009. Increase in voice level and speaker comfort in lecture rooms. J. Acoust. Soc. Am. 125, 2072-2083.



Rys. 7. Wykres czasu pogłosu RT w funkcji częstotliwości – porównanie sali pustej i zapętnionej (opracowanie własne)

Fig. 7. Diagram of reverberation time RT in the frequency function – comparison of the empty room and the room with students (own study)

- [4] Hodgson M., 1999. Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 1810.
- [5] Kulowski A., 2011. Akustyka sal, zalecenia projektowe dla architektów. Wyd. Politechniki Gdańskiej.
- [6] Mikulski W., 2013. Wyniki badań wpływu adaptacji akustycznych sal lekcyjnych na jakość komunikacji werbalnej. *Med. Pr.* 64(2), 207-215.
- [7] Pelegrin-Garcia D., Brunskog J., 2012. Classroom acoustics design guidelines based on the optimization of speaker conditions. *Euronoise Prague*.
- [8] PN-B-02151-4:2015. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- [9] Radosz J., 2012. Wpływ właściwości akustycznych sal lekcyjnych na poziom ciśnienia akustycznego mowy nauczycieli. *Med. Pr.* 63(4), 409-417.
- [10] Radosz J., 2013. Global index of the acoustic quality of classrooms. *Arch. Acoust.* 38(2), 159-168.
- [11] Radosz J., Mikulski W., 2012. Ocena właściwości akustycznych pomieszczeń pracy nauczycieli na przykładzie wybranych szkół podstawowych. *Bezp. Pr. Nauk. Prakt.* 6, 16-19.
- [12] Rasmussen B., Brunskog J., Hoffmeyer D., 2012. Reverberation time in classrooms – Comparison of regulations and classification criteria in the Nordic countries. *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, BNAM 2012 Odense, Denmark*.
- [13] Siebein Gary W., Gold M.A., Siebein Glen W., Ermann M., 2000. Ten ways to provide a high-quality acoustical environment in schools. *LSHSS* 31(4), 376-384.
- [14] http://acousticalsociety.org/about_acoustics/acoustics_of_classrooms (Booklet –Classroom Acoustics I) (dostęp: 01.03.2016).

PROBLEMATYKA POGŁOSOWOŚCI W SALI DYDAKTYCZNEJ

STRESZCZENIE. W pracy podjęto problematykę akustyki sal dydaktycznych, opierając się na najnowszej normie PN-B-02151-4. Omówiono powszechnie występujący problem nadmiernego pogłosu i przedstawiono zalecenia projektowe dla wnętrz sal lekcyjnych. Zbadano salę dydaktyczną Wydziału Architektury Politechniki Poznańskiej pustą i wypełnioną studentami. Otrzymane wyniki wskazują, że parametry akustyczne znacznie odbiegają od rekomendowanych. Odnosząc się do zaleceń podawanych w normie, zaproponowano korektę akustyczną.

Słowa kluczowe: pogłos w salach lekcyjnych, czas pogłosu w salach dydaktycznych

THE ISSUE OF REVERBERANCE IN A SEMINAR ROOM

SUMMARY. The paper discusses the issue of acoustics in seminar rooms and is based on the latest standard PN-B-02151-4. The paper describes the common problem of excessive reverberation and presents requirements for the design stage for seminar rooms. The subject under investigation was a seminar room at the Faculty of Architecture at Poznan University of Technology, with and without students. The results show that the acoustic parameters considerably differ from the recommended values. In reference to recommendations given in the standard, acoustic correction was suggested.

Key words: reverberance in classrooms, reverberation time in seminar rooms