

BADANIE AKUSTYKI WSPÓŁCZESNYCH KOŚCIOŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU KONSTRUKCJI

1. WSTĘP

L iteratura przedmiotu dotycząca problematyki akustyki w kościołach nie jest tak obszerna jak w przypadku zagadnień sal koncertowych i operowych. Jednakże temat podejmowany jest coraz częściej, niektóre z wybranych publikacji omówiono poniżej.

Z publikacji książkowych w języku polskim, omawiających problem akustyki w kościele katolickim, dostępne są dwie prace. Pierwsza „Czynniki akustyki w architektonicznym projektowaniu kościołów” autorstwa Dominiki Wróblewskiej i Andrzeja Kulowskiego [18] w sposób przystępny dla architektów omawia zagadnienie projektowania akustycznego. Szczególnie cenne jest omówienie sytuacji posoborowej, z podaniem zaleceń i wytycznych projektowych również w zakresie architektonicznym. Drugą pozycją jest książka „Podstawy akustyki obiektów sakralnych” Zbigniewa Engla, Jacka Engla, Krzysztofa Kosaty i Jerzego Sadowskiego [4]. Oprócz podania wytycznych projektowych omówiono w niej metody prowadzenia badań akustycznych w kościołach, jak również przedstawiono przykładowe badania kościołów.

Sposób prowadzenia pomiarów akustycznych przedstawiono również w publikacji „Guidelines for acoustical measurements in churches” [11]. Artykuł stanowi rodzaj przewodnika wykonywania pomiarów akustycznych w kościołach. Zagadnienie zostało szeroko omówione z uwzględnieniem sposobu pomiaru dla obiektów o rzucie podłużnym i centralnym.

W książce „Computational acoustics in architecture” [14] jeden z rozdziałów poświęcono akustyce kościołów. Szeroko opisano w nim problematykę akustyki. Oceniono własności akustyczne kościołów, począwszy od wczesnochrześcijańskich aż do późnobarokowych. Następnie scharakteryzowano typowy dla obszaru Seville gotycki kościół w stylu mudéjar z drewnianym dachem. Przedstawiono również trzy dotyczące kościołów projekty, w których autorzy brali udział.

Liczne artykuły w języku angielskim poruszają różne aspekty bogatej problematyki akustyki architektonicznej kościoła katolickiego. Niektóre z artykułów omówiono poniżej. Artykuł „Acoustic Rehabilitation of the Church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid” [3] prezentuje problematykę współczesnego kościoła Santa Ana in Moratalaz w Madrycie. Przeprowadzono badania w kościele i zaproponowano korektę akustyczną, aby zmniejszyć zbyt długi czas pogłosu.

Wnikliwe studium akustyczne współczesnego kościoła na podstawie badań akustycznych Sao Carlom Borromen w mieście Curitiba w Brazylii przedstawiono w artykule „Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ mea-

surements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index" [13].

Z kolei w artykule „Acoustic Characterization of Worship Ambience in Catholic Churches – Old Goa's Capela do Monte A comprehensive example” [17], przedstawiono pomiary w Old Goa's Capela do Monte, stanowiące nowe podejście do badań akustycznych w kościołach. Wyniki są wykorzystywane do opisu nastroju modlitewnego danego wnętrza.

Podjęmowana jest często problematyka większych historycznych kościołów. Do takich publikacji należy m.in. A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga [2]. W artykule na przykładzie katedry w Maladze przedstawiono eksperymentalne podejście do badań kościołów katedralnych. Opisane zagadnienia odnoszą się w szczególności do przestrzeni dużych obiektów sakralnych składających się z licznych podprzestrzeni, takich jak nawa, chór, kaplice boczne. W pracy Sound space reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel [1] przedstawiono symulacje komputerowe katedry w Seville. Badano, jak dekorowanie wnętrza z okazji różnych historycznych wydarzeń, takich jak na przykład kanonizacja Ferdynanda III Kastylijskiego w 1671 roku, zmieniało akustykę wnętrza. Do symulacji wykorzystano program CATT-Acoustic.

Problem pogłosowości został opisany między innymi w pracy „Akustyka wielofunkcyjna wewnątrz sakralnych” [8], w której autorzy poruszają problem nadmiernej pogłosowości na przykładzie kościoła św. Pawła w Bochni. Na podstawie pomiarów i symulacji akustycznych zaproponowano korektę akustyczną. Z kolei w publikacji „Acoustic properties of the selected churches in Poland” [5] przedstawiono propozycję nowej metody oceny akustycznej obiektów sakralnych za pomocą wskaźnika globalnego jakości akustycznej. Opisano zastosowanie proponowanej metody wskaźnikowej dla pięciu kościołów rzymskokatolickich.

Problematyką „pochłaniania dźwięku przez wiernych” zajmujących ławki kościelne zajęto się w artykule „On site validation of sound absorption measurements of occupied pews” [12]. Badania wykonano zarówno w laboratorium, jak również *in situ* w sześciu kościołach.

Wnętrza sakralne wykorzystuje się również na potrzeby koncertowe, dlatego interesująca jest publikacja „Churches as Auditoria: Analysis of Acoustical Parameters for a Better Understanding of Sound Quality” [10]. Przeprowadzono badania w wybranych kościołach Genewy. Badano przystosowanie akustyczne wnętrza do potrzeb koncertowych.

2. PROBLEMATYKA WSPÓŁCZENEGO BUDOWNICTWA SAKRALNEGO

Najpoważniejszym problemem akustycznym występującym we współczesnym budownictwie sakralnym jest nadmierny pogłos. W wyniku występującego zbyt długiego czasu pogłosu pojawia się uciążliwy hałas pogłosowy. Niekorzystne odczucia akustyczne dodatkowo wzmagają się przez dochodzące dźwięki uderzeniowe, które powstają, gdy w kościele jest twarda posadzka. Podstawowym utrudnieniem dla przebiegu liturgii, które jest związane ze zbyt długim czasem pogłosu, jest trudność ze zrozumieniem przekazu słownego. W efekcie obiekt staje się mało funkcjonalny. Dodatkowo należy podkreślić, że wraz z wprowadzeniem przez Sobór Watykański II w roku 1965 do obrządku języków

narodowych w miejsce łąciny wymagania odnośnie zrozumiałości przekazu słownego są szczególnie istotne.

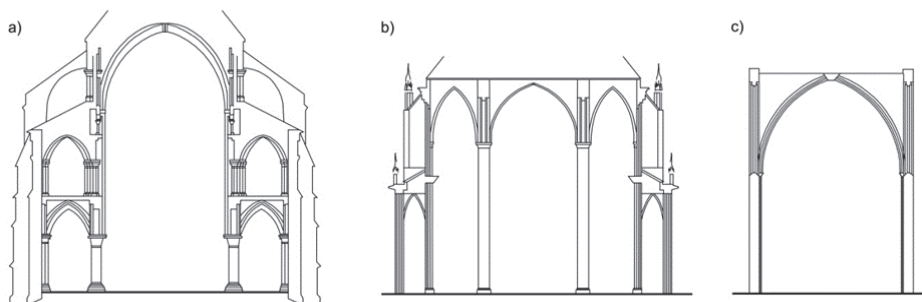
W stosunku do kościołów historycznych współczesne budownictwo sakralne napotyka na szczególne problemy. Zgodnie ze współczesnymi tendencjami architektonicznymi projektanci posługują się chętnie oszczędnością wyrazu, ascetyzmem w operowaniu detalem w połączeniu ze stosowaniem materiałów odbijających dźwięk (takich jak np. szkło, beton, kamień). Przy tym projektowane są często rozległe przestrzenie jednonawowe bez dodatkowych podprzestrzeni. Takie rozwiązania sprzyjają powstawaniu kolejnych wad akustycznych, takich jak na przykład echo.

Współcześnie występuje wiele materiałów dźwiękochłonnych, które z powodzeniem mogą pomóc w uzyskaniu odpowiednich własności akustycznych wnętrza. Rozwiązania akustyczne zaczynają być coraz bardziej doceniane, gdyż stosowanie ich nie musi oznaczać kompromisów z dobrą architekturą.

W kościołach budowanych w latach 80. w Poznaniu generalnie nie brano pod uwagę akustyki. Poprawny efekt akustyczny uzyskiwany był jedynie przez przypadek. Podczas prowadzenia badań przez autora w kościołach poznańskich okazało się, że głównym elementem wpływającym na uzyskanie akceptowalnych warunków akustycznych jest konstrukcja sufitu.

3. KONSTRUKCJA SUFITU WSPÓŁCZESNEGO KOŚCIOŁA

We współczesnych kościołach powszechnie stosuje się przekrycie za pomocą konstrukcji kratownicowej bądź żelbetowej. Wprowadzenie stali do budownictwa, a następnie konstrukcji żelbetowych wpłynęło na zmiany przestrzenne w budownictwie sakralnym. Stalowe kratownicowe konstrukcje lub stropy wykonane z żelbetu pozwalają na przekrycie znacznych rozpiętości bez stosowania podpór pośrednich. W historycznych kościołach było to niemożliwe. Ówczesne możliwości konstrukcyjne pozwalały na budowanie kościołów jednoprzestrzennych (salowych) wyłącznie o małych rozpiętościach. Historyczne kościoły o dużych rozpiętościach mają natomiast liczne podprzestrzenie, tworzone przez nawy boczne, transepty czy też kaplice. Na rysunku 1 można zauważyć pokazano przekroje historycznych kościołów, wśród których są układ z nawami bocznymi dla typu kościoła bazylikowego i halowego oraz jednoprzestrzenny kościół salowy.



Rys. 1. Przekroje historycznych kościołów: a) bazylika, b) kościół halowy, c) kościół salowy. (opracowanie własne na podstawie [7])

Fig. 1. a) basilica, b) hall church, c) aisleless church. (own study, on the basis of [7])

Liczne podprzestrzenie, które występują w kościołach historycznych, wpływają na zmniejszenie pogłosowości. Z kolei historyczny jednoprzestrzenny kościół salowy ze względu na ówczesne możliwości konstrukcyjne ma niewielką rozpiętość pomiędzy ścianami w porównaniu ze współczesnymi rozwiązaniami. Rozległe przestrzenie współczesnych kościołów powodują, że wyraźnie wzrasta czas pogłosu. Pojawiają się również inne czynniki, które wpływają negatywnie na akustykę wnętrza we współczesnym budownictwie sakralnym. Jest to po pierwsze współczesny styl architektoniczny charakteryzujący się minimalizmem i oszczędnością detalu. Dodatkowo stosowane powszechnie w budownictwie sakralnym materiały wykończeniowe, takie jak szkło, tynk cementowo-wapienny, beton czy też kamień należą do materiałów mocno odbijających dźwięk. W efekcie często spotyka się wnętrza sakralne mające poważne wady akustyczne, takie jak hałas pogłosowy czy też echo.

4. BADANIA AKUSTYCZNE

Podjęto badania wpływu konstrukcji stropu współczesnego kościoła katolickiego na akustykę wnętrza. Zbadano dwa kościoły jednoprzestrzenne o podobnej kubaturze, jeden ze stropem żelbetowym, a drugi ze stropem o konstrukcji kratownicowej.

Badania akustyczne prowadzono z zastosowaniem wszechkierunkowego źródła dźwięku, karty dźwiękowej Brüel & Kjær ZE-0948 USB i programu DIRAC. Generowano sygnał e-sweep i wykonano pomiary: RT, Ts, C80, C50. Do analizy wybrano parametry, które w literaturze przedmiotu zaliczane są do podstawowych w kwestii oceny własności akustycznych wnętrza sakralnego [18]. Pomierzone parametry akustyczne porównano z wartościami zalecanymi dla kościołów [6, 9]. Źródło dźwięku było ustawione przed ołtarzem na wysokości 1,5 m. Rozmieszczenia punktów pomiarowych pokazano na rzutach. Ze względu na symetrię w obu kościołach przyjęto punkty pomiarowe po jednej stronie osi symetrii.

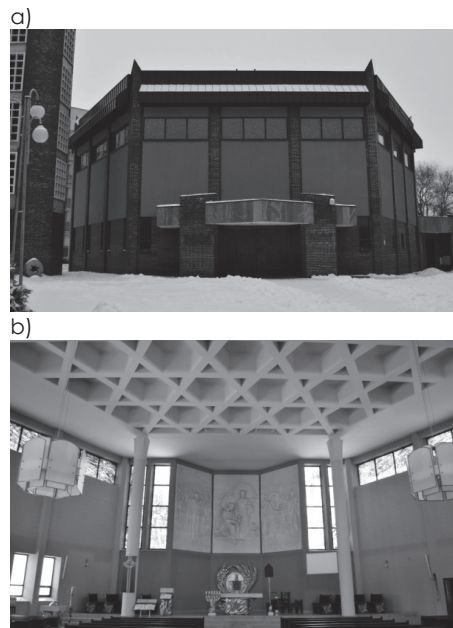
4.1. Kościół ze stropem o konstrukcji żelbetowej

Wybrano Kościół Narodzenia Pańskiego, którego kubatura wynosi 4800 m³ (rys. 2a). Krótką charakterystykę akustyczną kościoła w odniesieniu do innych poznanych kościołów przedstawiono w [16]. Elementy nośne konstrukcji stropu i dachu wykonano jako monolityczne żelbetowe. Budowę Kościoła Narodzenia Pańskiego prowadzono w latach 1995-2009 według projektu Jerzego Liśniewicza i Jana Sosnowskiego. Kościół ma rzut sześcioboku, gładkie ściany pokryte są tynkiem. Jedyne w prezbiterium w trójbocznej wnęcie znajduje się płaskorzeźba. Witraże w postaci podłużnych pasów znajdują się w górnych partiach ścian. W dolnej części umiejscowione są natomiast parami jednoskrzydłowe i dwukwaterowe okna. W prezbiterium symetrycznie rozmieszczono cztery pasy witraży, po dwa z każdej strony. W nawie kościoła od strony wejścia znajduje się rozległa empora, która ma ażurową żelbetową balustradę. W kościele nie ma organów. Charakterystycznym elementem wnętrza jest masywny żelbetowy sufit z motywem nawiązującym do kształtu gwiazdy, który tworzy kasetony (rys. 2b). Jego konstrukcja opiera się na ścianach i dodatkowo na sześciu słupach. Sufit ma rozrzeźbiony charakter. Takie rozwiązanie sufitu sprzyja rozpraszaniu dźwięku w pomieszczeniu, jednakże użyte materiały i gładkie ściany

powodują, że pochłanianie dźwięku jest małe. Na rysunku 3 pokazano rzut kościoła z rozmieszczeniem punktów pomiarowych.

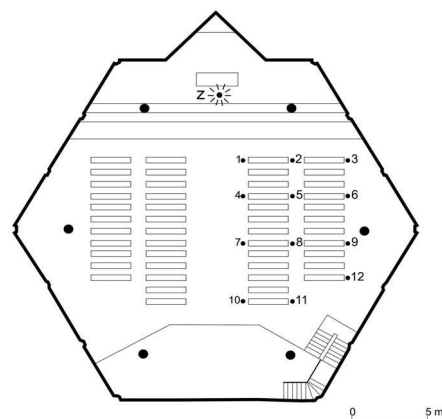
4.2. Kościół ze stropem o konstrukcji kratownicowej

W kościele Imienia Maryi elementy nośne konstrukcji stropu i dachu wykonano z zastosowaniem dźwigarów stalowych. Badania w tym obiekcie przeprowadzono powtórnie. Wcześniejsze badania z użyciem innej konfiguracji sprzętu badawczego przedstawiono w [15]. Kościół Imienia Maryi według projektu Jerzego Liśniewicza powstał na miejscu dawnego kościoła erygowanego w 1934 r. Konsekracja nowej, większej świątyni miała miejsce w 1982 r. Zachowano mury prezbiterium dawnego, mniejszego kościoła, natomiast pozostałe ściany nie nawiązują architektonicznie do dawnego budynku. Kościół ma rzut czworoboku, a jego kubatura wynosi 5100 m^3 (rys. 4a). Na ścianach znajduje się gładki tynk cementowo-wapienny i tynk nakrapiany typu baranek. Boczne ściany w większości są przeszklone. Przeszklenia są poprzedzielane filarami obłożonymi drewnem. Drewno znajduje się również w tylnej części kościoła na balustradzie chóru. Jest to system listew, który tworzy strukturę rozpraszającą dźwięk. W kościele znajdują się Ponadto rozbudowane organy. Piszczalaki są zarówno w prezbiterium jak i na tylnej ścianie. Pokrycie dachu stanowią żelbetowe płyty korytkowe, które spoczywają na górnym pasie kratownicy. Sufit z masywnej boazerii z drewna modrzewiowego jest podwieszany do dolnego pasa kratownicy (rys. 4b). Na suficie na foli rozłożono warstwę waty szklanej o grubości 20 cm. W konstrukcji dachu można wyróżnić trzy typy kratownic. Jeden z dźwigarów, o rozpiętości 21 m w kierunku poprzecznym kościoła i wyso-



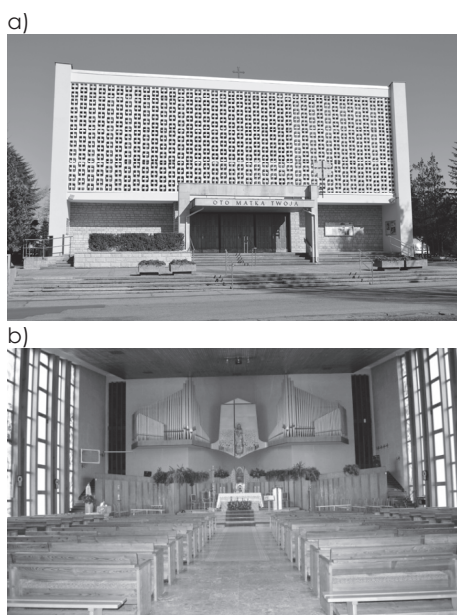
Rys. 2. Kościół Narodzenia Pańskiego: a) budynek, b) sufit żelbetowy (fot. autor)

Fig. 2. Church of the Nativity of Our Lord: a) the building, b) reinforced concrete ceiling (photo by author)



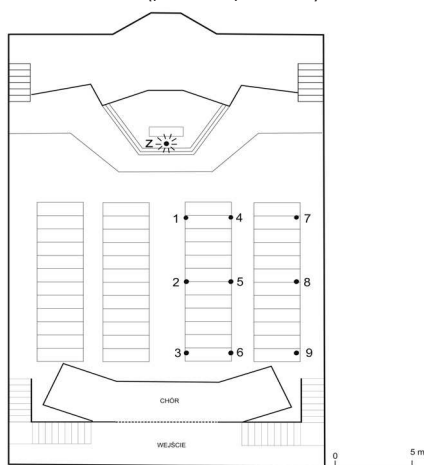
Rys. 3. Rzut kościoła Narodzenia Pańskiego z zaznaczeniem źródła dźwięku i punktów pomiarowych (opracowanie własne)

Fig. 3. View of the Church of the Nativity of Our Lord with marked sound source and measuring points (own study)



Rys. 4. Kościół Imienia Maryi: a) budynek, b) drewniany sufit powieszony do konstrukcji kratownicowej (fot. autor)

Fig. 4. The Name of Mary Church: a) the building, b) wooden ceiling suspended to the truss (photo by author)



Rys. 5. Rzut kościoła Imienia Maryi z zaznaczeniem źródła dźwięku i punktów pomiarowych (opracowanie własne)

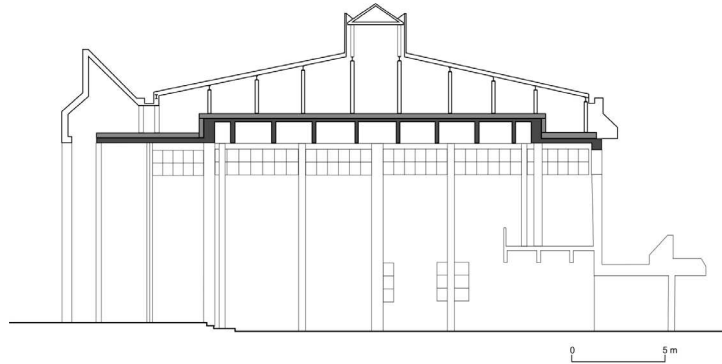
Fig. 5. View of the Name of Mary Church with marked sound source and measuring points (own study)

kości 2,35 m w środku rozpiętości, pełni rolę podciągu. Na nim oparte są dwa pozostałe typy kratownic w rozstawie co 3 m. Kratownice te mają wysokość 1,2 m i rozpiętość odpowiednio 10 m i 21 m. Na rysunku 5 pokazano rzut kościoła z rozmieszczeniem punktów pomiarowych i źródło dźwięku.

5. PORÓWNANIE WPŁYWU KONSTRUKCJI KRATOWNICOWEJ I ŻELBETOWEJ NA AKUSTYKĘ WNĘTRZA

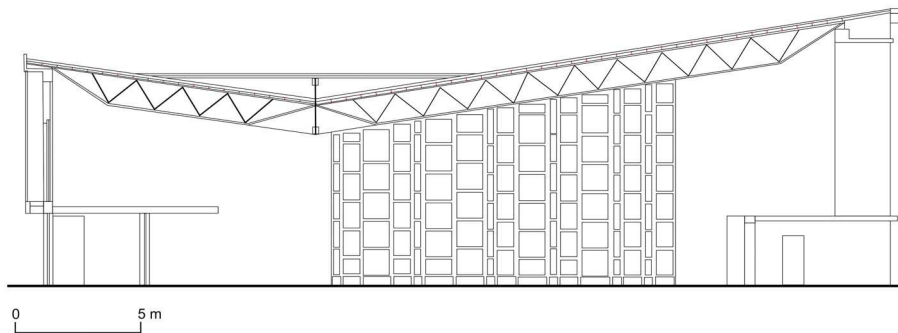
W kościele Narodzenia Pańskiego występuje monolityczna żelbetowa konstrukcja stropu w formie rusztu, który tworzy sześcioboczne kasetony (rys. 2b i 6), a wraz z gładkimi, pokrytymi tynkiem ścianami tworzy mocno pogłosową przestrzeń. Użyte materiały o małym pochłanianiu dźwięku powodują, że czas pogłosu we wnętrzu jest zbyt duży. Czas pogłosu wynosi $RT = 5,0$ s, podczas gdy zalecenia dla kościołów o tej kubaturze kształtują się od 1,3 s do 1,7 s dla kościołów z przewagą przekazu słownego i od 1,7 s do 2,7 s dla kościołów, w których istotna jest muzyka organowa [6].

W kościele Imienia Maryi zastosowano strop, którego elementami nośnymi są kratownice (rys. 7). Do pasa dolnego kratownicy przymocowano sufit wykonany z drewnianej boazerii, na którym na folii luźno ułożono warstwę z waty szklanej o grubości około 20 cm. Nad watą szklaną znajduje się pusta przestrzeń o wysokości około 1 m. Pokrycie dachu stanowią żelbetowe płyty korytkowe oparte na pasie górnym kratownic. Tak wykonana konstrukcja dachu stanowi strukturę, która pochłania dźwięk. Pomierzony czas pogłosu wynosi $RT = 1,8$ s i jest zgodny z zaleceniami. Na rysunku 8 pokazano przebiegi czasu pogłosu w funkcji częstotliwości dla obu analizowanych kościołów. Wykresy różnią się znacznie od siebie.



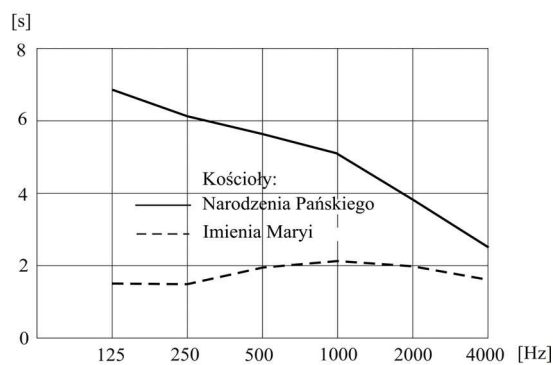
Rys. 6. Kościół Narodzenia Pańskiego, strop żelbetowy – przekrój podłużny (opracowanie własne)

Fig. 6. Reinforced concrete ceiling, the Church of the Nativity of Our Lord – longitudinal section (own study)



Rys. 7. Strop kratownicowy, kościół Imienia Maryi – przekrój podłużny (opracowanie własne)

Fig. 7. Truss ceiling, the Name of Mary Church – longitudinal section (own study)



Rys. 8. Czas pogłosu w funkcji częstotliwości – porównanie kościołów Narodzenia Pańskiego i Imienia Maryi (opracowanie własne)

Fig. 8. Reverberation time in the frequency function – comparison of the Church of the Nativity of Our Lord and the Name of Mary Church (own study)

6. WNIOSKI

Dobre warunki akustyczne i czas pogłosu bliski wartościom zalecanym uzyskano w kościele o kratownicowej konstrukcji nośnej dachu. Taka konstrukcja nie była zastosowana w celu uzyskania poprawnych warunków akustycznych we wnętrzu. Lepszą akustykę uzyskano przez przypadek.

W kościele o żelbetowej konstrukcji nośnej dachu sufit ma atrakcyjną wizualnie formę. Pod względem akustycznym natomiast stanowi ustrój o bardzo małym pochłanianiu dźwięku. Pozostałe materiały wykończeniowe mają również mały współczynnik pochłaniania dźwięku. Czas pogłosu wynosi 5,0 s i jest znacznie przekroczony. W kościele tym należałoby wykonać korektę akustyczną.

Analizowane przypadki mogą być wskazówką dla konstruktorów i architektów, jak projektować konstrukcję nośną dachu, aby uzyskać poprawne warunki akustyczne we wnętrzu.

LITERATURA

- [1] Alonso A., Sendra J.J., Suárez R., 2014. Sound space reconstruction in the Cathedral of Seville for major feasts celebrated around the main chancel. Proceedings of Forum Acusticum, Krakow.
- [2] Álvarez-Morales L., Zamarréño T., Girón S., Galindo M., 2014. A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Build. Environ.* 72, 102-115.
- [3] Buenó A.M., León A.L., Galindo M., 2012. Acoustic Rehabilitation of the Church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid. *Arch. Acoust.* 37(4), 435-446.
- [4] Engel Z., Engel J., Kosła K., Sadowski J., 2007. Podstawy akustyki obiektów sakralnych. ITE Kraków.
- [5] Engel Z., Kosła K., 2005. Acoustic properties of the selected churches in Poland. *MECHANICS* 24(3).
- [6] Everest F.A., Pohlmann K.C., 2009. Master handbook of acoustics. Mc Graw Hill New York – Chicago – San Francisco.
- [7] Koch W., 1996. Style w architekturze. Świat Książki Warszawa.
- [8] Kosła K., Kamiński T., 2011. Akustyka wielofunkcyjna wewnątrz sakralnych, *Czasopismo Techniczne (Architektura)* 11, 115-122.
- [9] Kulowski A., 2011. Akustyka sal, zalecenia projektowe dla architektów. Wyd. Politechniki Gdańskiej.
- [10] Magrini A., Ricciardi P., 2003. Churches as Auditoria: Analysis of Acoustical Parameters for a Better Understanding of Sound Quality. *Build. Acoust.* 10(2), 135-158.
- [11] Martellotta F., Cirillo E., Carbonari A., Ricciardi P., 2009. Guidelines for acoustical measurements in churches. *Appl. Acoust.* 70, 378-388.
- [12] Martellotta F., Della Crociata S., D'Alba M., 2011. On site validation of sound absorption measurements of occupied pews. *Appl. Acoust.* 72, 923-933.
- [13] Queiroz de Sant'Ana D., Trombetta Zannin P.H., 2011. Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Build. Environ.* 46, 511-517.

- [14] Sendra J.J., Zamarreño T., Navarro J., 1999. Acoustics in churches. [W:] Computational Acoustics in Architecture, red. J.J. Sendra, WITpress Southampton – Boston, 133-177.
- [15] Sygulska A., 2012. Acoustic study of two modern churches. Vibrations in Physical Systems 25, 381-386.
- [16] Sygulska A., 2014. Acoustic investigations of the contemporary churches in Poznań. Vibrations in Physical Systems 26, 281-288.
- [17] Tavares M.A.P., Rajagopalan S., Sharma S.J., Carvalho A.P.O., 2008. Acoustic Characterization of Worship Ambience in Catholic Churches – Old God's Capela do Monte. Inter Noise, Shanghai, China.
- [18] Wróblewska D., Kulowski A., 2007. Czynniki akustyki w architektonicznym projektowaniu kościołów. Wyd. Politechniki Gdańskiej.

BADANIE AKUSTYKI WSPÓŁCZESNYCH KOŚCIOŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM WPŁYWU KONSTRUKCJI

STRESZCZENIE W pracy przedstawiono studium wpływu konstrukcji sufitu na akustykę wnętrza w kościele. Pokazano, jak dwa rodzaje konstrukcji – żelbetowa i kratownicowa – wpływają na pogłosowość wnętrza. Zbadano dwa współczesne kościoły, jeden o suficie podwieszanym do konstrukcji kratownicowej, drugi natomiast z sufitem żelbetowym. Otrzymane wyniki wskazują, że w przypadku zastosowania konstrukcji kratownicowej parametry akustyczne uzyskują wartości bliskie zalecanym. Tymczasem w kościele z sufitem żelbetowym warunki akustyczne są bardzo niekorzystne.

Słowa kluczowe: akustyka kościoła, czas pogłosu w kościele, architektura kościoła

INVESTIGATION OF ACOUSTICS OF CONTEMPORARY CHURCHES WITH A FOCUS ON THE INFLUENCE OF A CONSTRUCTION TYPE

SUMMARY. The paper is a study of the influence of ceiling construction on interior acoustics in the church. The paper presents how two construction types, i.e. a reinforced concrete one and a truss one, influence reverberance of the interior. Two churches were investigated, one of which has a ceiling suspended on the truss, while the other has a reinforced concrete ceiling. The results show that if the truss construction is applied, the acoustic parameters are close to the recommended values. In contrast, acoustic quality of the church with a reinforced concrete ceiling was low.

Key words: church acoustics, reverberation in churches, church architecture