

dr inż. Krzysztof Robert Czech^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9828-4774

prof. dr hab. inż. Czesław Miedzialowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-7901-7598

Badania wpływu drgań przekazywanych z różnych źródeł na budynek Katedry Białostockiej

Research on the impact of vibration transmitted from various sources on the Białystok Cathedral building

DOI: 10.15199/33.2022.11.13

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania własne i uzyskane wyniki oddziaływań dynamicznych na konstrukcję budynku Katedry Białostockiej. Prace badawcze przeprowadzono w związku z pęknięciami sklepień w obiekcie i przypuszczeniami, że zostały one spowodowane nadmiernymi drganiami przenoszonymi na konstrukcję. W analizie uwzględniono różne źródła drgań (koncerty miejskie, koncert organowy, głośniki niskotonowe ustawione wewnątrz obiektu, płytowe wibracyjne zagęszczarki gruntowe). Zaprezentowano aparaturę pomiarową i metodę przeprowadzania pomiarów oraz wyniki pomiarów przyspieszeń drgań w wybranych punktach i kierunkach pomiarowych, podając jednocześnie interpretację ich wpływu na budynek. Przedstawiono również przybliżoną ocenę wpływu na Katedrę drgań generowanych podczas koncertów miejskich wg DIN 4150-3.

Słowa kluczowe: zabytkowy kościół; przyspieszenia drgań; prędkości drgań; wpływ drgań na budynek.

Abstract. This paper presents the research and obtained results of dynamic interactions on the structure of the Białystok Cathedral. The research was carried out in connection with cracks in the vaults of the building and assumptions that they were caused by excessive level of vibration transmitted to the Cathedral. Various sources of vibration (city concerts, organ concert, woofers set up inside the building, vibrating plate compactors) were included in the analysis. The measurement equipment and the methodology of carrying out the measurements were presented. The results of measurements of vibration accelerations at selected measurement points and directions are discussed, together with an interpretation of their impact on the building. An approximate assessment of the impact of vibrations generated during city concerts according to DIN 4150-3 is also presented.

Keywords: historic church; vibration accelerations; vibration velocities; effect of vibrations on the building.

Przedmiotem badań prowadzonych przez autorów artykułu jest budynek kościoła (fotografia 1) wzniesiony w latach 1900–1905. Wnętrze obiektu jest trójnawowe, z jedną nawą wyższą i dwiema niższymi. Całkowita długość budynku wynosi 68 m, szerokość trzech naw – 28 m, wysokość nawy głównej – 23 m, naw bocznych – 12 m, a wysokość wież – 72 m. Przy wejściu do budynku zlokalizowano dwie strzeliste, ażurowe wieże. Przekrycie naw wykonano jako sklepienia krzyżowe, natomiast na skrzyżowaniu nawy głównej i transeptu jest sklepienie gwiaździste. Ponad dachy naw bocznych wyproszono łuki przyporowe ścian nawy środkowej na osi wewnętrznych filarów. Pełnią one rolę konstrukcyjną i estetyczną. Przenoszą siły rozporu z nawy środkowej przez wieżyczki, pilastry i przypory na fundament. Łuku

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*)} Adres do korespondencji: k.czech@pb.edu.pl



Fot. 1. Budynek Katedry Białostockiej: a) widok ogólny; b) wnętrze nawy głównej
Photo 1. Building of the Białystok Cathedral: a) general view; b) the interior of the main nave

przyporowego nie wykonano tylko na osi starego kościoła, tzw. białego. Budynek jest przykryty stromym dachem dwuspadowym z koszami na skrzyżowaniu nawy głównej i transeptu oraz przy wieżach.

Budynek kościoła jest obiektem murywanym bez podpiwniczenia. Fundamenty wykonano z kamienia, a cokół z prostopadłościennych bloków granitowych. Zewnętrzne ściany nośne oraz filary wewnętrzne wzniesiono z cegły

ceramicznej, w tym w wielu fragmentach z cegły odpowiednio profilowanej. Sklepienia są również ceglane.

Dach ma konstrukcję drewnianą, dwupoziomową, typu wieszarowego, a obecne pokrycie z ceramicznej dachówki zakładkowej. Na dolnych belkach-ściągach ułożona jest podłoga.

Na powierzchni sklepień od dołu i od góry od lat były widoczne liczne pęknięcia i zarysowania o największej intensywności na osi kościoła białego (fotografia 2). W latach 20. XXI w. przystąpiono do kolejnego remontu budynku Katedry, w tym naprawy pękniętych sklepień, kiedy zaczął odpadać z nich tynk. Równocześnie szukano przyczyny powstania pęknięć i zarysowań. Jedną z przyjętych hipotez był negatywny wpływ drgań komunikacyjnych przenoszonych przez podłoże gruntowe na budynek Katedry. Jednak odległość od obiektu do najbliższej z ulic o ruchu kołowym (ul. Kościelna z nawierzchnią asfaltową) wynosi ponad 32 m. Na ulicy Kościelnej obowiązuje ograniczenie prędkości do 20 km/h (strefa zamieszkania), natomiast ulica H. Sienkiewicza o nawierzchni z kostki granitowej od budynku Katedry jest oddalona o ponad 110 m. Wstępne pomiary dynamiczne wykluczyły negatywny wpływ drgań komunikacyjnych przenoszonych przez podłoże gruntowe na Katedrę Białostocką. Analo-

giczną hipotezę o szkodliwości drgań komunikacyjnych na budynek innego zabytkowego kościoła przyjęto w [1]. Opisy wielu podobnych badań i analiz wpływu drgań parasejsmicznych (w tym komunikacyjnych) przenoszonych na budowlę znajdziemy też m.in. w pracach [2–4]. Bazują one głównie na wytycznych poprzedniej wersji normy „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki” [5]. Te i inne badania wskazują, że drgania komunikacyjne rejestrowane w budynkach rzadko przekraczają poziom, który można uznać za odpowiedzialny za powstawanie rys i spękań.

Kolejną z rozpatrywanych hipotez była wersja, że przyczyną destrukcji sklepień mogą być koncerty muzyczne odbywające się cyklicznie co roku na przyległym rynku. W celu weryfikacji tej hipotezy przeprowadzono wiele pomiarów przyspieszeń drgań w wybranych punktach Katedry, m.in. podczas koncertów *Białystok – Miasto Dobrej Muzyki* – zorganizowanych w 2013 r., 2014 r. oraz w 2015 r. Dodatkowo, już po iniekcji rys, w 2019 r. przeprowadzono dodatkowe pomiary dynamiczne (ukierunkowane na operacyjną analizę modalną), w których jako źródła drgań wykorzystano:

- dźwięki generowane w trakcie koncertu organowego;
- biały szum emitowany z niskotonowych głośników koncertowych ustawionych wewnątrz Katedry;

• zagęszczarki płytowe pracujące w bezpośrednim sąsiedztwie podłużnych ścian zewnętrznych Katedry.

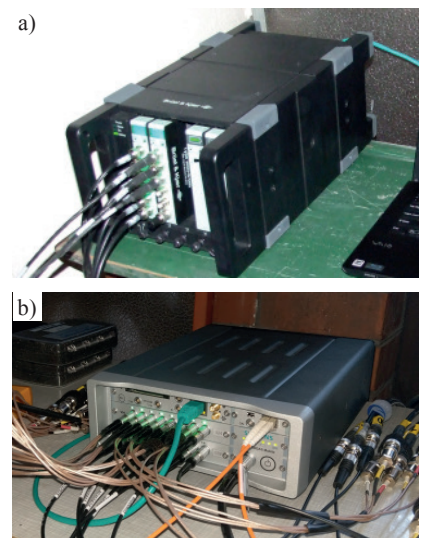
Podobne pomiary mające na celu wyznaczenie rzeczywistych parametrów modalnych wielkogabarytowych obiektów prezentowane są m.in. w [6–8].

W artykule przedstawiono badania własne i uzyskane wyniki w postaci ekstremalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w wybranych kierunkach i punktach pomiarowych przyjętych we-

wnątrz budynku Katedry oraz przybliżoną ocenę wpływu drgań na konstrukcję budynku.

Aparatura i realizacja pomiarów

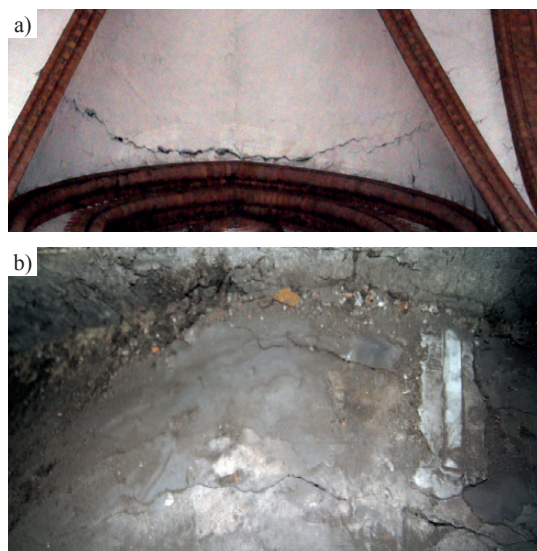
Pomiary dynamiczne prowadzono w latach 2013–2015 oraz po iniekcji rys w 2019 r. W latach 2013–2015 do rejestracji przyspieszeń drgań wykorzystano 12-kanalowy i 24-bitowy system pomiarowy typu LAN-XI z dynamiką wejść na poziomie 160 dB, złożony z ramki, dwóch modułów baterii zasilających typu 2831-A oraz dwóch modułów pomiarowych typu 3050-B-060 (fotografia 3a).



Fot. 3. Systemy akwizycji danych podczas pomiarów w Katedrze: a) LAN-XI; b) SCADAS Recorder

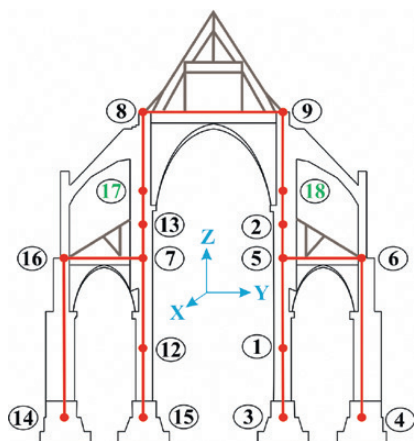
Photo 3. Data acquisition systems during measurements in the Cathedral: a) LAN-XI; b) SCADAS Recorder

W 2013 i 2014 r. pomiary przeprowadzono w trzech punktach pomiarowych i trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (X – poziomym równoległym do ścian zewnętrznych, Y – poprzecznym poziomym oraz pionowym Z) przyjętych na murach budynku od strony źródła drgań. Przyjmując numerację punktów zgodną z przyjętą w 2019 r., w przypadku pomiarów realizowanych w 2013 i 2014 r. były to punkty pomiarowe nr: 14 (ściana zewnętrzna w poziomie posadzki), 16 (ściana zewnętrzna w poziomie podłogi górnej kondygnacji nawy bocznej) oraz 17 (ściana zewnętrzna nieco po-



Fot. 2. Przykładowe pęknięcia sklepień: a) widok od dołu; b) widok od góry
Photo 2. Examples of vault cracks: a) bottom view; b) top view

wyżej oparcia sklepień nawy głównej). Schematycznie lokalizację przyjętych punktów pomiarowych pokazano na rysunku 1 (wspólna numeracja w przypadku pomiarów w latach 2013–2019). W 2015 r. pomiary przeprowadzono w czterech punktach pomiarowych w kierunku prostopadłym do mury- nych ścian katedry (Y) oraz w kierunku pionowym (Z). Były to odpowiednio punkty pomiarowe nr: 14, 16, 17 oraz 18 (ściana zewnętrzna nieco powyżej oparcia sklepień nawy głównej – od strony ul. Kościelnej). W latach 2013–2014 do rejestracji przyspieszeń drgań wykorzystano zestaw ośmiu jednoosiowych akcelerometrów sejsmicznych typu 8340 (o czułości 10 V/g i zakresach pomiarowych: 0,1–1500 Hz, 0,5 g pk) oraz jeden jednoosiowy akcelerometr sejsmiczny typu 3191A (5 V/g, 0,08–1000 Hz, 1,0 g pk). W 2015 r. wykorzystano jedynie osiem akcelerometrów typu 8340.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów i kierunków pomiarowych
Fig. 1. Diagram of the distribution of measurement points and directions

W 2019 r. w pomiarach wykorzystano 48-kanałowy i 24-bitowy system pomiarowy złożony z dwóch rejestratorów SCADAS Recorder – fotografia 3b (32-kanałowy) oraz SCADAS Mobile (16-kanałowy). W pierwszym z nich zainstalowano 24-kanałową kartę pomiarową typu V24 oraz 8-kanałową kartę pomiarową typu VB8-II. Drugi z rejestratorów wyposażono w dwie 8-kanałowe karty pomiarowe typu VB8-II. Dzięki połączeniu światłowodami oba urządzenia pracowały jako jeden integralny system pomiarowy

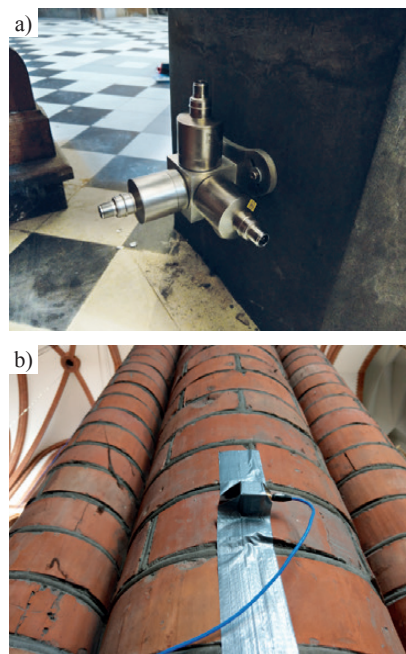
umożliwiający rejestrację sygnałów we wszystkich 48 kanałach w tym samym czasie. Przyspieszenia drgań konstrukcji Katedry Białostockiej rejestrowano za pomocą wymienionych typów akcelerometrów piezoelektrycznych jedno- i trójosiowych:

- jednoosiowe akcelerometry sejsmiczne typu 8340 (10 V/g; 0,1–1500 Hz, 0,5 g pk),
- jednoosiowe akcelerometry sejsmiczne typu 393B12 (10 V/g; 0,15–1500 Hz, 0,5 g pk),
- jednoosiowe akcelerometry sejsmiczne typu 3191A (5 V/g; 0,08–1000 Hz, 1,0 g pk),
- trójosiowe niskoczęstotliwościowe akcelerometry typu TLD356B18 (1 V/g; 0,3–5000 Hz, 5,0 g pk).

Akcelerometry sejsmiczne mocowano do badanej konstrukcji za pomocą podstaw pomiarowych trójpunktowo kotwionych metalowymi kołkami. Akcelerometry trójosiowe przyklejano do konstrukcji, wykorzystując sześciokątne metalowe podstawy pomiarowe. Przykładowe punkty pomiarowe z zainstalowanymi akcelerometrami pokazano na fotografii 4.

W pomiarach przeprowadzonych w 2019 r. przyjęto, że punkty pomiarowe zostaną rozmieszczone w takich miejscach (rysunek 1), aby możliwe było jednoczesne rejestrowanie przyspieszeń drgań w jednej płaszczyźnie w przekroju pionowym przez Katedrę. Akcelerometry podłączono do rejestratorów SCADAS Recorder i SCADAS Mobile (zlokalizowanych po obu stronach bocznych galerii Katedry) za pomocą okablowania o długości 15–45 m. Wiarygodność pomiarów przyspieszeń drgań potwierdzono w warunkach laboratoryjnych poprzedzających pomiary drgań w Katedrze, sprawdzając każdy z akcelerometrów (wraz z dedykowanym okablowaniem) na przenośnym wzbudniku kalibracyjnym firmy Modal Shop typu 9100D. W przypadku pomiarów przeprowadzonych w 2019 r. zaplanowano, że przyspieszenia drgań będą rejestrowane w kilku etapach:

- etap I – rejestracja przyspieszeń drgań podczas koncertu organowego (fotografia 5);
- etap II – rejestracja przyspieszeń



Fot. 4. Przykładowe punkty pomiarowe:
a) trójpunktowo kotwiona w murze podstawa pomiarowa z zamontowanymi akcelerometrami sejsmicznymi typu 8340;
b) przyklejony do filara akcelerometr trójosiowy typu TLD 356B18

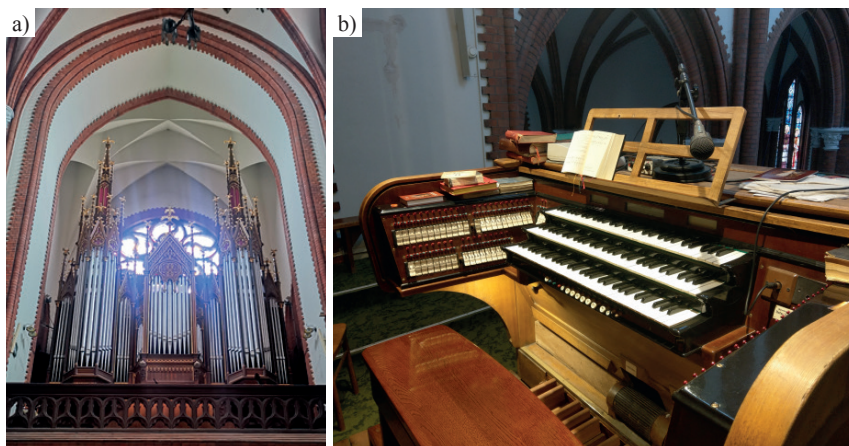
Fig. 4. Examples of measuring points: a) three-point anchored measuring base in the wall with mounted seismic accelerometers type 8340; b) triaxial accelerometer type TLD 356B18 glued to the pillar

drgań generowanych tzw. białym szumem odtwarzanym z zestawu czterech niskotonowych głośników koncertowych ustawionych wewnątrz Katedry (fotografia 6);

■ etap III – rejestracja przyspieszeń drgań generowanych pracą w bezpośrednim sąsiedztwie murów Katedry dwóch różnego typu zagęszczarek płytowych (typu BPU 3750Ats o częstotliwości generowanych drgań 90 Hz / siłę odśrodkowej 37 kN / mocy 5,2 kW / ciężarze 240 kg oraz typu LG500 – 60 Hz / 60 kN / 9,1 kW / 478 kg) – fotografia 7.

Wyniki pomiarów

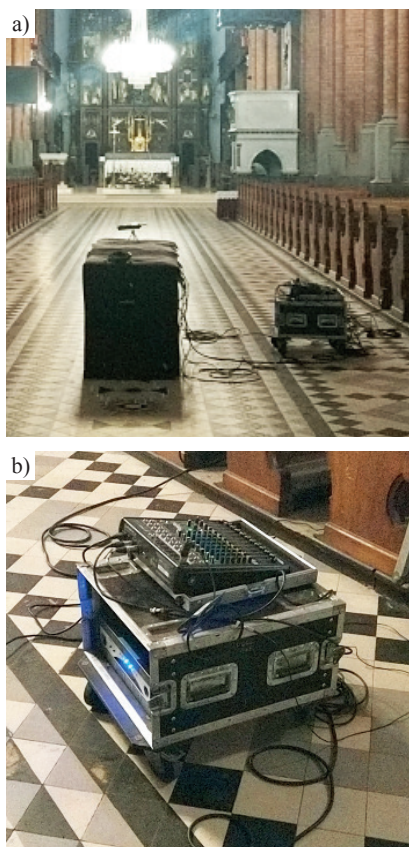
W latach 2013–2015 pomiary przyspieszeń drgań przeprowadzono z szybkością 4096 próbek/s. Przykładowe akcelerogramy pokazano na rysunku 2. Zgodnie z normą PN-B-02170:2016-12 [5] ocenę wpływu drgań przekazywanych przez podłogę na budynek powinno się prowadzić w przypadku pasma częstotliwości 0,5–100 Hz. Wyższa częstotliwość



Fot. 5. Źródło drgań w etapie I: a) organy kościelne; b) konsola
Photo 5. Source of vibrations in stage I: a) church organ; b) console

przebiegów czasowych zestawiono w tabelach 1÷3. W każdym z kanałów pomiarowych wartości ekstremalne wyróżniono przez podkreślenie.

W celu ograniczenia zestawień tabelarycznych prezentowanych w artykule do niezbędnego minimum, wyniki pomiarów przeprowadzonych w 2019 r. zamieszczono w jednej zbiorczej tabeli (tabela 4), prezentując wyłącznie wartości ekstremalne w przypadku każdego z wybranych kanałów (istotnych z punktu widzenia ewentualnego wpływu drgań na budynek). Dodatkowo, w celu łatwiejszego porównania uzyskanych wyników,

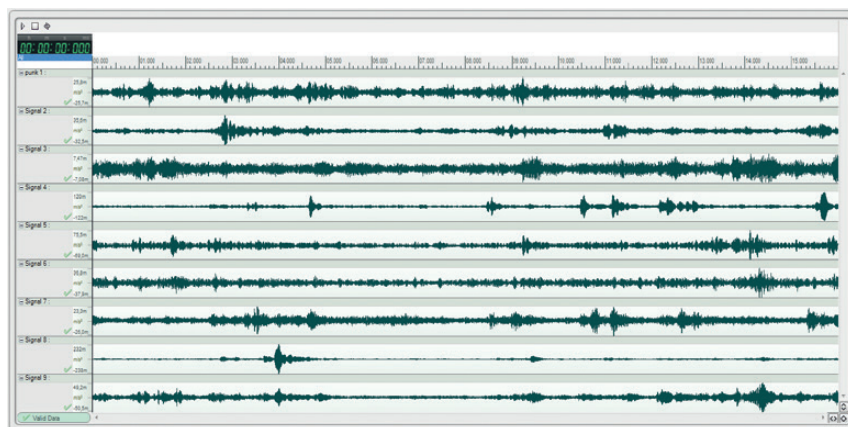


Fot. 6. Źródło białego szumu (etap II): a) zestaw głośników niskotonowych; b) wzmacniacz i konsola sterowania
Photo 6. White noise source (stage II): a) set of woofers; b) amplifier and control console

z punktu widzenia dynamiki budowlanie nie ma istotnego wpływu na konstrukcję budynków. Z tego powodu, podczas wymienionych koncertów miejskich, zarejestrowane przebiegi czasowe przyspieszeń drgań poddano filtracji dolno-przepustowej z częstotliwością odcięcia 100 Hz, a następnie dla tak cyfrowo



Fot. 7. Zagęszczarki płytowe: a) typu BPU 3750Ats; b) typu LG500
Photo 7. Plate compactors: a) type BPU 3750Ats; b) type LG500



Rys. 2. Przykładowe akcelerogramy zarejestrowane podczas koncertu w 2013 r. (koncert zespołu Klezmafour)
Fig. 2. Examples of accelerograms recorded during a concert in 2013 (concert of the Klezmafour band)

przetworzonych danych wyznaczono wartości minimalne i maksymalne. Uzyskane wartości przyspieszeń kilku wybranych najniekorzystniejszych

w tabeli 4 wprowadzono także wartości ekstremalne z pomiarów realizowanych w latach 2013–2015 (prezentowane w tabelach 1÷3).

Tabela 1. Ekstremalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s²] – koncert miejski w 2013 r.
Table 1. Extreme values of vibration accelerations [mm/s²] – city concert in 2013

Punkt pomiarowy i kierunek pomiaru	14 p.p.			16 p.p.			17 p.p.		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Plik: Katedra1-Klezmafour-11	2,8	3,0	2,9	17,8	9,5	21,2	7,9	6,8	7,2
Plik: Katedra1-Zagrobely-1	2,6	2,8	2,7	13,2	7,8	13,1	5,2	4,9	5,3
Plik: Katedra1-Zagrobely2-3	1,7	1,9	1,6	11,9	5,6	12,3	4,8	4,8	4,6
Wartości ekstremalne	2,8	3,0	2,9	17,8	9,5	21,2	7,9	6,8	7,2

Tabela 2. Ekstremalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s²] – koncert miejski w 2014 r.
Table 2. Extreme values of vibration accelerations [mm/s²] – city concert in 2014

Punkt pomiarowy i kierunek pomiaru	14 p.p.			16 p.p.			17 p.p.		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Plik: Katedra2-Oksana8-3	2,6	2,5	5,3	12,1	9,4	17,3	6,2	10,8	9,8
Plik: Katedra2-Enejl-1	2,7	2,3	3,3	7,8	6,9	14,2	3,6	6,4	4,7
Plik: Katedra2-Marika1-2	3,6	2,6	4,6	13,3	13,6	17,0	6,9	17,0	6,8
Wartości ekstremalne	3,6	2,6	5,3	13,3	13,6	17,3	6,9	17,0	9,8

Tabela 3. Ekstremalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s²] – koncert miejski w 2015 r.
Table 3. Extreme values of vibration accelerations [mm/s²] – city concert in 2015

Punkt pomiarowy i kierunek pomiaru	13 p.p.			14 p.p.			16 p.p.			18 p.p.		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Plik: Katedra3-Szlachcic-1	–	5,0	–	–	2,4	1,9	–	9,0	–	–	3,7	2,6
Plik: Katedra3-Bednarek-10	–	11,0	–	–	4,2	3,3	–	18,0	–	–	7,6	5,3
Plik: Katedra3-T.Love-5	–	8,5	–	–	3,0	3,2	–	12,8	–	–	4,4	4,1
Wartości ekstremalne	–	11,0	–	–	4,2	3,3	–	18,0	–	–	7,6	5,3

Porównanie i przybliżona analiza wpływu drgań na Katedrę

Z danych w tabeli 4 wynika, że drgania rejestrowane w Katedrze podczas koncertów miejskich zorganizowanych

w Białymstoku w latach 2013–2015 (tabele 1÷3) charakteryzują się amplitudami przyspieszeń drgań w płaszczyźnie poziomej (w kierunkach X i Y) nieprzekraczającymi 18 mm/s² w paśmie częstotliwości do 100 Hz. Poziom

przyspieszeń drgań rejestrowanych wewnątrz Katedry w trakcie koncertów miejskich jest w większości kanałów pomiarowych tylko nieznacznie większy niż podczas koncertu organowego – z wyjątkiem punktów pomiarowych nr 13/17 (17.p.p. przyjęto ok. 1 m powyżej 13.p.p.) i nr 2/18, w których w trakcie koncertu organowego rejestrowano odpowiednio od ok. czterech do sześciu razy wyższe amplitudy drgań w kierunku poziomym prostopadłym do murów (kierunek Y – maks. 70,3 mm/s²) oraz prawie 10-krotnie większe w kierunku podłużnym do murów (kierunek X – maks. 67,5 mm/s²).

W przypadku źródła drgań w postaci niskotonowych głośników koncertowych ustawionych wewnątrz Katedry i generujących biały szum w paśmie do 32 Hz uzyskano ekstremalne wartości przyspieszeń drgań na poziomie zbliżonym do rejestrowanych w trakcie koncertów miejskich (maks. ok. 10 mm/s², porównując dane w tych samych punktach pomiarowych, w których rejestrowano drgania w latach 2013–2015). Natomiast zwiększenie szerokości pasma białego szumu do 64 Hz powoduje znaczny wzrost amplitud drgań elementów konstrukcyjnych Katedry. Przy tego typu źródle drgań rejestrowano od

Tabela 4. Zestawienie ekstremalnych wartości przyspieszeń drgań [mm/s²] w wybranych punktach i kierunkach pomiarowych w latach 2013–2019

Table 4. Summary of extreme vibration acceleration values [mm/s²] at selected measurement points and directions in 2013–2019

Punkt pomiarowy i kierunek pomiaru	1/18 p.p.		3 p.p.		4 p.p.		8 p.p.		9 p.p.		13/17 p.p.		14 p.p.		15 p.p.		16 p.p.	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Koncert miejski z 2013 r.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,9	6,8	2,8	3,0	–	–	17,8	9,5
Koncert miejski z 2014 r.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6,9	17,0	3,6	2,6	–	–	12,1	13,6
Koncert miejski z 2015 r.	–	7,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	11,0	–	4,2	–	–	–	18,0
Koncert organowy (2019 r.)	40,9	44,4	1,7	2,9	2,6	6,9	12,8	19,1	15,0	29,9	67,5	70,3	1,2	1,0	1,3	1,8	8,5	5,9
Biały szum 0–32 Hz (2019 r.)	12,3	13,5	2,1	2,5	0,9	3,3	8,9	36,1	10,8	40,4	10,2	10,4	1,0	1,1	1,1	1,8	7,9	6,6
Biały szum 0–64 Hz (2019 r.)	35,9	25,2	13,6	11,4	4,1	9,1	53,6	96,7	67,9	95,2	32,7	22,8	7,2	5,0	9,6	11,5	22,1	19,4
Zągęszczarka Wacker Neuson BPU 3750Ats (2019 r.)	42,3	38,9	11,3	18,3	14,8	37,5	23,3	61,6	53,4	75,5	25,2	21,3	5,3	4,6	6,0	10,0	17,1	11,1
Zągęszczarka płytowa Dynapack LG500 (2019 r.)	79,4	70,3	29,3	59,1	38,8	69,2	70,2	102,3	101,8	166,2	53,2	39,4	10,7	14,1	16,2	25,3	45,3	31,0

dwu do sześciu razy większe amplitudy drgań niż w przypadku białego szumu generowanego w paśmie częstotliwości do 32 Hz (maks. przyspieszenie drgań na poziomie ok. 33 mm/s² dla punktów pomiarowych identycznych jak przyjęto w latach 2013–2015 oraz aż 97 mm/s² w ósmym punkcie pomiarowym w kierunku Y).

Zdecydowanie największy poziom drgań jest generowany w Katedrze w przypadku pracy zagęszczarki płytowej typu LG500 w bezpośrednim sąsiedztwie murów. Maksymalna amplituda drgań w tym przypadku przekroczyła 166 mm/s² (9 p.p., kierunek Y). Należy podkreślić, iż zespół badawczy nie stwierdził pojawienia się nowych zarysowań i spękań w Katedrze zarówno po pomiarach dynamicznych przeprowadzonych w latach 2013–2015, jak i po pomiarach w 2019 r. (już po iniekcji rys), w których wykorzystano jeszcze bardziej intensywne źródła drgań (tabela 4).

Przedstawione rozważania wskazują, że przyczyn spękań sklepień Katedry należy szukać gdzie indziej niż w falach dźwiękowych przenoszonych drogą powietrzną na konstrukcję Katedry podczas koncertów miejskich i innych źródłach drgań niż omówionych w artykule. Dokładne określenie wpływu zarejestrowanych drgań na stan techniczny Katedry wymaga precyzyjnego przestrzennego modelowania numerycznego i analiz wykorzystujących oprogramowanie bazujące na algorytmie Metody Elementów Skończonych (MES). Jako wymuszenie kinematyczne należy przyjąć najniekorzystniejsze z zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań [5]. Tego typu podejście jest jednak niezwykle pracochłonne i kosztowne.

Ocenę wpływu zarejestrowanych drgań na stan techniczny Katedry można również przeprowadzić w sposób przy-

bliżony zgodnie z PN-B-02170:2016-12 [5] lub DIN 4150-3 [9]. W analizowanym przypadku przybliżoną ocenę zdecydowanie łatwiej jest przeprowadzić, bazując na wytycznych normy DIN 4150-3 [9]. Przyjmując, że w trakcie pomiarów mieliśmy do czynienia z drganiami krótkotrwałymi (wg normy drganiami, które nie trwały wystarczająco długo, aby spowodować zmiany zmęczeniowe w konstrukcji oraz nie powodowały drgań rezonansowych) ocenę prowadzi się na podstawie prędkości drgań wyznaczonych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach w poziomie fundamentów analizowanej konstrukcji w pasmach częstotliwości: 1–10 Hz, 10–50 Hz, 50–100 Hz oraz niezależnie od częstotliwości drgań w płaszczyźnie poziomej stropu/podłogi najwyższej kondygnacji. W przypadku drgań długotrwałych ocenę należy przeprowadzić na podstawie prędkości drgań rejestrowanych w poziomie stropu najwyższej kondygnacji (niezależnie od częstotliwości drgań).

W przypadku obiektów nietypowych, podlegających ochronie konserwatora zabytków prędkości drgań krótkotrwałych, w zależności od analizowanego pasma częstotliwości, nie powinny przekraczać 3÷10 mm/s. W przypadku drgań długotrwałych wartość progowa jest niższa i wynosi 2,5 mm/s. Przekroczenie wymienionych wartości progowych może skutkować ograniczeniem „użytkowości budynku” (z angielskiego: „serviceability of the building”) [9] zazwyczaj utożsamianym z możliwością pojawienia się uszkodzeń typu kosmetycznego. Przekroczenie wartości progowej nie jest jednoznaczne z tym, że wystąpią jakiegokolwiek uszkodzenia budynku.

Aby przeprowadzić przybliżoną ocenę drgań na Katedrę, zgodnie z wytycznymi normy DIN 4150-3 [9], niezbędne jest po raz kolejny zastosowanie cyfro-

wego przetworzenia sygnałów w celu przeprowadzenia odpowiedniej filtracji pasmowej zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań, jednokrotnego całkowania przefiltrowanego sygnału, usunięcia liniowego trendu z wyniku całkowania oraz wyznaczenie wartości szczytowych prędkości drgań. Finalny wynik całkowania w przypadku najniekorzystniejszych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w trakcie koncertu miejskiego zorganizowanego w 2013 r. zestawiono w tabeli 5. Zawarte w niej dane wskazują, że prędkość drgań wyznaczona w poziomie podłogi budynku (14. p.p.) w przypadku odpowiednich pasm częstotliwości oraz prędkości w poziomie nieco poniżej stropu najwyższej kondygnacji budynku (17. p.p.), zgodnie z [9], charakteryzują się znacznie mniejszą intensywnością niż wartości progowe utożsamiane z drganiami mogącymi powodować uszkodzenia kosmetyczne budynków – nie tylko w przypadku drgań długotrwałych, ale i krótkotrwałych. Analogiczne są wyniki w przypadku prędkości drgań wyznaczonych dla najniekorzystniejszych przebiegów czasowych zarejestrowanych w trakcie koncertów miejskich w 2014 i 2015 r., dlatego też w tabelach 6 i 7 zamieszczono wyniki całkowania wyłącznie pasm w przedziale częstotliwości 1–100 Hz oraz dodatkowo 1–2048 Hz (w celu sprawdzenia, czy wyższa częstotliwość ma istotny wpływ na wyznaczane wartości prędkości drgań).

Z zestawień w tabelach 5÷7 wynika, że ekstremalne amplitudy prędkości drgań wyznaczone dla przebiegów czasowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w Katedrze w trakcie koncertów miejskich, zorganizowanych w latach 2013–2015, nie przekraczają 0,1 mm/s i są znacznie mniejsze niż

Tabela 5. Maksymalna prędkość drgań – koncert miejski w 2013 r.

Table 5. Maximum vibration velocity – city concert in 2013

Lokalizacja p.p.	W poziomie podłogi / górnej powierzchni fundamentów												Poniżej ostatniej kondygnacji			
	14-X				14-Y				14-Z				17-X	17-Y		
Kanal i kierunek pomiaru	1-10	10-50	50-100	1-2048	1-10	10-50	50-100	1-2048	1-10	10-50	50-100	1-2048	1-100	1-2048	1-100	1-2048
Pasma częstotliwości [Hz]																
Ekstremalna prędkość drgań [mm/s]	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,07	0,03	0,04

Tabela 6. Maksymalna prędkość drgań – koncert miejski w 2014 r.

Table 6. Maximum vibration velocity – city concert in 2014

Lokalizacja p.p.	W poziomie podłogi / górnej powierzchni fundamentów						Poniżej ostatniej kondygnacji			
	14-X		14-Y		14-Z		17-X		17-Y	
Pasma częstotliwości [Hz]	1-10	1-2048	1-10	1-2048	1-10	1-2048	1-10	1-2048	1-10	1-2048
Ekstremalna prędkość drgań [mm/s]	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,08	<u>0,09</u>	<u>0,09</u>

Tabela 7. Maksymalna prędkość drgań – koncert miejski w 2015 r.

Table 7. Maximum vibration velocity – city concert in 2015

Lokalizacja p.p.	W poziomie podłogi						Górna część budynku			
	14-X		14-Y		14-Z		17-X		17-Y	
Pasma częstotliwości [Hz]	1-100	1-2048	1-100	1-2048	1-100	1-2048	1-100	1-2048	1-100	1-2048
Ekstremalna prędkość drgań [mm/s]	–	–	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,06	<u>0,07</u>	<u>0,07</u>

wartości progowe (2,5 mm/s w przypadku drgań długotrwałych). Zgodnie z zapisami normy DIN 4150-3 [9] należy przyjąć, że drgania generowane w trakcie koncertów miejskich organizowanych w Białymstoku w pobliżu budynku Katedry nie mogą być przyczyną zidentyfikowanych zarysowań i spękań sklepień.

Podsumowanie i wnioski

Zabytkowa Katedra Białostocka na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci doznała znacznych uszkodzeń w postaci licznych zarysowań i spękań widocznych na murowanych sklepieniach. Wstępne hipotezy sugerowały, że ich przyczyną są drgania komunikacyjne. Po przeanalizowaniu odległości budynku od kołowych ciągów komunikacyjnych, rodzaju nawierzchni, rodzaju pojazdów mogących się przemieszczać ulicami w pobliżu Katedry oraz przeprowadzeniu wstępnych pomiarów dynamicznych taką możliwość wykluczono.

Rozpatrywaną hipotezą była też możliwość wystąpienia uszkodzeń sklepień Katedry na skutek nadmiernych drgań generowanych podczas koncertów miejskich organizowanych na pobliskim rynku i przenoszonych na budynek w postaci fal dźwiękowych oraz wibracji przenoszonych przez podłoże na fundamenty. Monitoring drgań w trakcie koncertów miejskich prowadzony w latach 2013–2015 oraz oględziny Katedry wskazały, że po żadnym z koncertów nie zaobserwowano

nowych zarysowań i spękań murów, ani nie stwierdzono inicjacji nowych zarysowań. Maksymalne wartości przyspieszeń drgań rejestrowanych w trakcie koncertów w pasmie częstotliwości do 100 Hz nie przekraczały 18 mm/s². Przeprowadzone przybliżone oceny wpływu drgań na konstrukcję budynku zgodnie z wytycznymi normy DIN 4150-3 [9] wykazały, że ekstremalne wartości prędkości drgań wyznaczone dla najmniej korzystniejszych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w latach 2013–2015 nie przekraczają 0,1 mm/s. Są znacznie mniejsze niż wartości progowe wskazane przez normę [9] jako mogące powodować uszkodzenia konstrukcji zmniejszające jej użyteczność (utożsamiane zazwyczaj z uszkodzeniami kosmetycznymi).

Brak negatywnego wpływu tego typu drgań na konstrukcję Katedry potwierdzają również kolejne badania z 2019 r. – realizowane już po iniekcji rys i innych naprawach uszkodzeń konstrukcji budynku. Monitorowano wówczas poziom drgań wewnątrz Katedry przy innych, wybranych źródłach wymuszenia kinematycznego budynku do drgań. Należy stwierdzić, że poziom drgań rejestrowanych w budynku w 2019 r. był znacznie wyższy niż podczas koncertów miejskich (szczególnie w przypadku drgań generowanych wewnątrz Katedry białym szumem w paśmie częstotliwości do 64 Hz oraz drgań generowanych na zewnątrz budynku

w trakcie pracy zagęszczarek płytowych). Pomimo większej intensywności źródeł drgań wykorzystanych w 2019 r. nie zaobserwowano w Katedrze rys i spękań murów.

W kolejnym etapie planowane jest przeprowadzenie dokładnej oceny bazującej na analizach numerycznych trójwymiarowego modelu Katedry, z zastosowaniem oprogramowania wykorzystującego algorytm MES, i wymuszeniu kinematycznym w postaci najintensywniejszych z zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań. Opracowany model numeryczny musi zostać uprzednio odpowiednio zwalidowany z wykorzystaniem wyników z operacyjnej analizy modalnej danych zarejestrowanych w 2019 r.

Literatura

- [1] Kaczmarczyk S, Kawecki J, Kozioł K, Stypuła K. Diagnostyka zabytkowego kościoła z uwzględnieniem wpływu drgań komunikacyjnych. Czasopismo Techniczne z. 19. Budownictwo z. 3-B, 2011.
- [2] Kawecki J, Dulińska J, Kozioł K, Stypuła K, Tataro T. Oddziaływania parasejsmiczne przekazywane na obiekty budowlane. Wydawnictwo PK, Kraków, 2014.
- [3] Ciesielski R, Maciąg E. Drgania drogowe i ich wpływ na budynki, WKiŁ, 1990.
- [4] Ciesielski R, Kawecki J, Maciąg E. Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (Diagnostyka dynamiczna). ITB, 1993.
- [5] PN-B-02170:2016-12 – Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki. Polski Komitet Normalizacyjny, 2016.
- [6] Atamturktur S, Pavic A, Reynolds P. Sensitivity of Modal Parameters of Historic Monuments to Geometric Distortion. 26th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI), Orlando, Florida, 4-7 February 2008.
- [7] Atamturktur S. Traditional and operational modal testing of masonry vaults. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering and Computational Mechanics 16, September 2010, Issue EM3. 213-223.
- [8] Grosel J, Sawicki W, Wójcicki Z. Vibration measurements in analysis of historical structures (Pomiary i analizy drgań obiektów historycznych). Wiadomości Konserwatorskie / Journal of Heritage Conservation, 2012; 32:157-164.
- [9] DIN 4150-3 – Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. Deutsche Norm, 1999.

Przyjęto do druku: 22.09.2022 r.