

WPŁYW STANU TECHNICZNEGO NAWIERZCHNI DROGOWEJ NA PROPAGACJĘ POWIERZCHNIOWYCH DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH DO OTOCZENIA¹

KRZYSZTOF CZECH

dr, Katedra Mechaniki Konstrukcji,
Wydział Budownictwa i Inż. Śro-
dowiska, Politechnika Białostocka,
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok,
e-mail: k.czech@kmb.pb.edu.pl

Streszczenie. W artykule analizowany jest wpływ stanu technicznego nawierzchni drogowej i obciążenia dynamicznego od pojazdów na poziom drgań propagowanych drogą gruntową do otoczenia. Pomiary przyspieszeń drgań prowadzono w ośmiu lokalizacjach pomiarowych, w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o zróżnicowanym stanie technicznym nawierzchni: bitumicznej, betonowej, brukowanej oraz żwirowej. Obciążenie dynamiczne od pojazdów analizowano w trzech grupach: samochody osobowe i lekkie ciężarowe, samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3,5 t oraz autobusy. Analizę porównawczą prowadzono dla uśrednionych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań. Przeprowadzone badania dowodzą, iż nie zawsze wraz z istotnym pogorszeniem stanu technicznego nawierzchni mamy do czynienia z intensyfikacją negatywnych oddziaływań parasejsmicznych propagowanych do otoczenia.

Słowa kluczowe: drgania drogowe, propagacja drgań, przyspieszenia drgań

Wprowadzenie

W powszechnym przekonaniu drgania drogowe generowane ruchem pojazdów kołowych i propagowane drogą gruntową do otoczenia mają szkodliwy wpływ na budynki zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie ciągów komunikacyjnych i ich użytkowników. Temu stereotypowemu pogładowi przeczą wyniki większości dotychczas przeprowadzonych badań (m.in.: [1, 2, 3]) oraz badań własnych autora niniejszej pracy. Okazuje się, że w rzeczywistości, pomimo licznych skarg użytkowników budynków zlokalizowanych w pobliżu kołowych ciągów komunikacyjnych na nadmierny poziom drgań, rzadko kiedy mamy do czynienia z potwierdzonym negatywnym wpływem drgań komunikacyjnych na budynki. Jeśli taki wpływ stwierdzono, to zazwyczaj na poziomie, który możemy określić jako odczuwalny przez budynek, ale nieszkodliwy dla konstrukcji budynku (tzn. w budynku mogą się pojawiać pierwsze rysy w wyprawach i tynkach – nie dochodzi natomiast do zarysowań i uszkodzeń elementów konstrukcyjnych [4, 5]). Z destrukcyjnym wpływem drgań drogowych na budynki mamy do czynienia bardzo rzadko (między innymi z powodu szybkiego tłumienia geometrycznego i absorpcji drgań propagowanych w gruncie oraz w związku ze znaczącą redukcją amplitud drgań, do jakiej dochodzi na styku gruntu i budynku [6, 7]). Jednakże skargi użytkowników budynków na nadmierny poziom drgań nie muszą być bezpodstawne. Organizm człowieka sam w sobie jest doskonałym instrumen-

tem, który odczuwa drgania o stosunkowo niewielkiej intensywności (według [8] – drgania na poziomie odczuwalnym przez człowieka nazywane są progiem odczuwalności drgań) i nawet jeśli drgania propagowane z przyległych ciągów komunikacyjnych nie mają negatywnego wpływu na budynki – to mogą zaburzać komfort użytkowania tego typu obiektów.

Odczuwalny lub wręcz szkodliwy wpływ drgań na budynki stwierdzany jest zwykle w przypadku złego lub bardzo złego stanu technicznego nawierzchni drogowej (na co wskazuje większość dotychczas przeprowadzonych badań) w połączeniu z ruchem pojazdów typu ciężkiego oraz małymi odległościami budynków od źródła drgań [1, 3, 9]. Jednakże uważna obserwacja stanu nawierzchni drogowej i stanu przyległych do niej obiektów budowlanych może wskazywać, że nie zawsze decydujący wpływ na poziom drgań propagowanych do otoczenia ma zły stan techniczny nawierzchni drogi, gdyż zdarza się, że w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z nawierzchnią o stosunkowo złym stanie technicznym na budynkach nie uwiadcniają się uszkodzenia, podczas gdy w pobliżu innego odcinka tej samej drogi, ale z nawierzchnią w nieco lepszym stanie technicznym, może dochodzić do zarysowań i spękań elewacji budynku.

Celem niniejszego artykułu jest określenie wpływu stanu technicznego nawierzchni drogowej na poziom drgań drogowych generowanych ruchem lokalnym i propagowanych drogą gruntową do otoczenia na podstawie uśrednionych wartości maksymalnych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o czterech zróżnicowanych rodzajach nawierzchni: bitumicznej, betonowej, brukowanej oraz żwirowej.

Lokalizacje pomiarowe

W celu określenia wpływu, jaki może mieć pogarszający się stan techniczny nawierzchni drogowej na poziom drgań propagowanych drogą gruntową do otoczenia należało przyjąć po dwie lokalizacje pomiarowe znacząco różniące się stanem technicznym nawierzchni. Za punkt odniesienia przyjęto dane zarejestrowane w czterech lokalizacjach pomiarowych, w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o nawierzchniach: bitumicznej, betonowej, brukowanej i żwirowej o co najmniej średnim stanie technicznym nawierzchni. Następnie w każdej z powyższych dróg wytypowano kolejne lokalizacje pomiarowe charakteryzujące się złym lub bardzo złym stanem technicznym nawierzchni. Szczegółowy opis przyjętych lokalizacji oraz stanu technicznego nawierzchni drogowych zamieszczono poniżej:

¹ © Transport Miejski i Regionalny, 2013.

- lokalizacja pomiarowa nr 1 – Białystok, ulica Wiadukt – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi bitumicznej z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym (brak lokalnych nierówności, spękań czy przełomów – fotografia 1);
- lokalizacja pomiarowa nr 2 – Kleosin, ulica Zambrowska – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi bitumicznej z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym (lokalne nierówności oraz spękania poprzeczne na całej szerokości jezdni – fotografia 2);
- lokalizacja pomiarowa nr 3 – Białegostok, ulica Zastawie II – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z jezdnią o nawierzchni z betonu o średnim stanie technicznym (szczeliny poprzeczne o szerokościach dochodzących do 1,5 cm; brak wypełnienia szczelin w części górnej; na powierzchni płyt betonowych widoczne nieznaczne uszkodzenia poprzeczne – fotografia 3);
- lokalizacja pomiarowa nr 4 – Choroszcz, ulica Zastawie – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z jezdnią o nawierzchni z betonu o bardzo złym stanie technicznym (wykruszenia krawędzi płyt w pobliżu szczelin poprzecznych, znacznie większe szerokości szczelin poprzecznych niż w przypadku lokalizacji Nr 3; liczne spękania poprzeczne i nierówności nawierzchni – fotografia 4);
- lokalizacja pomiarowa nr 5 – Białystok, ulica Daleka – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi brukowanej (z kamienia polnego) o średnim stanie technicznym (lokalne nierówności bruku o w miarę jednolitej teksturze i równości ułożenia – fotografia 5);
- lokalizacja pomiarowa nr 6 Białystok, ulica Daleka (około 50 m od lokalizacji pomiarowej nr 5) – w bezpośrednim sąsiedztwie drogi brukowanej (z kamienia polnego) o złym stanie technicznym (niejednolita tekstura i znaczne nierówności w ułożeniu bruku; widoczny brak wypełnienia pomiędzy poszczególnymi kamieniami – fotografia 6);
- lokalizacja pomiarowa nr 7 – ulica Wodociągowa na trasie Krupniki–Klepacze koło Białegostoku – w bezpośrednim sąsiedztwie utwardzonej drogi gruntowej o nawierzchni żwirowej o średnim stanie technicznym (lokalne nierówności i nieznaczne uszkodzenia poprzeczne nawierzchni – głównie w części środkowej – fotografia 7);
- lokalizacja pomiarowa nr 8 – ulica Wodociągowa na trasie Krupniki–Klepacze w pobliżu Białegostoku – w bezpośrednim sąsiedztwie utwardzonej drogi gruntowej o nawierzchni żwirowej o złym stanie technicznym (lokalne nierówności i znaczne sfalowanie podłużne nawierzchni – fotografia 8).

Aparatura pomiarowa i rozmieszczenie czujników

Pomiary przyspieszeń drgań prowadzono z wykorzystaniem szesnastokanałowego komputerowego analizatora drgań KSD-400 z 16-bitową kartą przetwornika A/D NI USB-6210 firmy National Instruments i wzmacniaczami



Fot. 1. Lokalizacja pomiarowa nr 1
Źródło: opracowanie własne



Fot. 2. Lokalizacja pomiarowa nr 2
Źródło: opracowanie własne



Fot. 3. Lokalizacja pomiarowa nr 3
Źródło: opracowanie własne



Fot. 4. Lokalizacja pomiarowa nr 4
Źródło: opracowanie własne



Fot. 5. Lokalizacja pomiarowa nr 5
Źródło: opracowanie własne



Fot. 6. Lokalizacja pomiarowa nr 6
Źródło: opracowanie własne

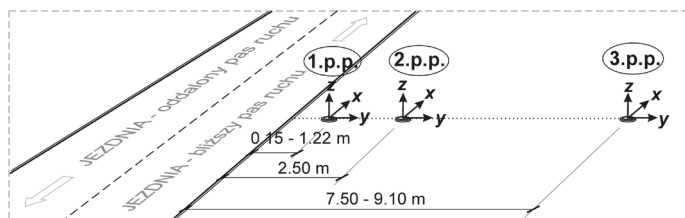


Fot. 7. Lokalizacja pomiarowa nr 7
Źródło: opracowanie własne



Fot. 8. Lokalizacja pomiarowa nr 8
Źródło: opracowanie własne

pomiarowymi współpracującymi z dziewięcioma niskoczęstotliwościowymi piezoelektrycznymi czujnikami przyspieszeń drgań firmy Dytran typu 3191A i 3187D rozmieszczonymi wzdłuż profili pomiarowych zorientowanych prostopadle do osi jezdni. W każdym z przyjętych profili pomiarowych akwizycję danych prowadzono w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (z – kierunek pionowy, x – kierunek równoległy do osi jezdni, y – kierunek prostopadły do osi jezdni), w trzech punktach pomiarowych (p.p.) usytuowanych na gruncie i oddalonych od krawędzi jezdni odpowiednio o: 0.15 ÷ 1.22 m – 1.p.p., 2.5 m – 2.p.p., oraz 7.5 ÷ 9.10 m – 3.p.p. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i czujników schematycznie pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie czujników i punktów pomiarowych w lokalizacjach pomiarowych
Źródło: opracowanie własne

W każdej z przyjętych lokalizacji pomiary dynamiczne realizowano przy wykorzystaniu czujników przyspieszeń przykręcanych do metalowych pierścieni z trzema bolcami wbitymi w grunt. Takie rozwiązanie powinno zapewnić lepsze związanie czujników z gruntem, w którym mierzone były drgania (podobnie jak w pracy [10]). Rejestrację przyspieszeń drgań w funkcji czasu prowadzono z szybkością 1024 próbek na sekundę przy włączonej filtracji antyaliasingowej. Stanowisko badawcze pokazano na fotografii 9.



Fot. 9. Stanowisko badawcze
Źródło: opracowanie własne

Wyniki pomiarów

Analizę wpływu stanu technicznego nawierzchni jezdni na poziom drgań propagowanych do otoczenia można przeprowadzić na kilka sposobów. Pierwszy z nich może polegać na analizie porównawczej wartości najmniej korzystniejszych spośród wszystkich przebiegów czasowych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacjach pomiarowych charakteryzujących się tym samym rodzajem nawierzchni i zróżnicowanym stanem technicznym. Inny sposób to analiza porównawcza wartości uśrednionych z wszystkich zarejestrowanych w przyjętych lokalizacjach pomiarowych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań – niezależnie dla każdej z analizowanych w pracy grup pojazdów generujących drgania. Pierwszy sposób wydaje się być uzasadniony z punktu widzenia projektantów konstrukcji budowlanych, którym ze względów projektowych może zależeć na pozyskiwaniu najmniej korzystniejszych wartości przyspieszeń drgań, jakie mogą wystąpić w bezpośrednim sąsiedztwie kołowych ciągów

komunikacyjnych. Jednakże tego typu dane nie zawierają jakiegokolwiek informacji określającej częstość występowania drgań na wskazanym poziomie. Może się okazać, że z taką intensywnością drgań jak w przypadku najmniej korzystniejszego z wszystkich zarejestrowanych w danej lokalizacji pomiarowej przebiegów czasowych mamy do czynienia niezwykle rzadko (na przykład raz na kilka dni). Z tego powodu celowe wydaje się być prowadzenie analiz porównawczych bazujących nie na wartościach najmniej korzystniejszych – tylko na wartościach uśrednionych w przypadku poszczególnych grup pojazdów. Również sposób generowania drgań powinien być odpowiednio dobrany do celu, który chcemy osiągnąć. Źródłem drgań w analizowanym przypadku mogą być zarówno przejazdy wynajętych pojazdów – np. samochodów ciężarowych o znanych parametrach odnośnie: liczby osi, masy całkowitej pojazdu, z góry ustalonej prędkości przejazdu itp., jak i przejazdy pojazdów ruchu lokalnego. W niniejszej pracy w trakcie planowania badań założono, że źródłem drgań propagowanych do otoczenia będą przejazdy pojazdów samochodowych ruchu lokalnego (przejazdy samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych o masie całkowitej do 3,5 t, przejazdy samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t oraz przejazdy autobusów), które generują drgania charakterystyczne w konkretnych lokalizacjach. Przyjmując takie założenie, nie wprowadzamy na daną drogę w sposób sztuczny pojazdów, które teoretycznie daną drogą mogą się poruszać, ale się nie poruszają, lub poruszają się bardzo rzadko. Ponadto prędkość przejazdu ww. pojazdów danymi drogami jest dostosowywana przez kierujących do rodzaju i stanu nawierzchni – a nie do z góry narzuconych wytycznych odnośnie prędkości, z jaką mają się poruszać – co ma istotne znaczenie, jeśli chodzi o rejestrację i analizę poziomu drgań rzeczywiście propagowanych do otoczenia w danej lokalizacji pomiarowej.

W tabelach 1 do 8 zestawiono uśrednione wartości maksymalnych przyspieszeń drgań z wszystkich zarejestrowanych w poszczególnych lokalizacjach pomiarowych przebiegów czasowych drgań generowanych przejazdami poszczególnych grup pojazdów. Dane prezentowane w tabelach (w funkcji odległości punktu pomiarowego od krawędzi jezdni i kierunku prowadzonego pomiaru) uzupełniono o wartości odchyłek standardowych, które pokazują rozrzuty zarejestrowanych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań wokół wartości średnich – co jest szczególnie istotne, gdy w pracy nie ma możliwości zaprezentowania wszystkich danych. W związku z tym, iż w większości analizowanych w pracy lokalizacji pomiarowych (poza jezdniami z nawierzchniami bitumicznymi) znaczna część przejazdów w obu kierunkach odbywała się środkiem drogi, przyjęto, że analiza porównawcza zostanie przeprowadzona dla wszystkich zarejestrowanych przejazdów w danej grupie pojazdów – niezależnie od kierunku ruchu. W nawiasach podano liczbę zarejestrowanych akcelerogramów w przypadku poszczególnych grup pojazdów.

Tabela 1

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 1										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.85 m	2.50 m	9.10 m	0.85 m	2.50 m	9.10 m	0.85 m	2.50 m	9.10 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y				
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×12)	Średnia arytmetyczna	14	13	7	13	10	9	17	11	9
	Odchylenie standardowe	8	6	3	7	2	2	12	3	2
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×23)	Średnia arytmetyczna	37	29	17	29	18	14	40	19	21
	Odchylenie standardowe	23	17	9	23	10	5	29	9	15
Przejazdy AUTOBUSÓW (×6)	Średnia arytmetyczna	54	24	13	93	19	13	79	29	14
	Odchylenie standardowe	93	30	10	184	21	9	138	36	9

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 2										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		1.22 m	2.5 m	7.5 m	1.22 m	2.5 m	7.5 m	1.22 m	2.5 m	7.5 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y				
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×13)	Średnia arytmetyczna	57	53	23	33	44	17	59	102	30
	Odchylenie standardowe	23	19	13	11	17	6	25	45	15
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×24)	Średnia arytmetyczna	186	143	51	98	130	35	179	293	67
	Odchylenie standardowe	131	79	21	81	65	9	143	174	24
Przejazdy AUTOBUSÓW (×5)	Średnia arytmetyczna	198	154	53	114	87	41	138	211	59
	Odchylenie standardowe	141	84	6	102	30	13	77	84	11

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 3										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.85 m	2.50 m	7.50 m	0.85 m	2.50 m	7.50 m	0.85 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y				
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×16)	Średnia arytmetyczna	216	131	62	215	67	73	327	59	73
	Odchylenie standardowe	63	36	11	95	22	23	182	18	16
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×12)	Średnia arytmetyczna	747	420	208	1147	213	224	1497	424	348
	Odchylenie standardowe	273	116	85	783	86	97	696	206	239

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 4										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.15 m	2.50 m	7.50 m	0.15 m	2.50 m	7.50 m	0.15 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×16)	Średnia arytmetyczna	217	102	17	148	77	25	249	118	23
	Odchylenie standardowe	128	33	6	72	46	20	215	79	12
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×7)	Średnia arytmetyczna	486	218	43	330	168	49	666	366	50
	Odchylenie standardowe	259	99	8	170	84	16	468	289	12

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 5										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.65 m	2.50 m	7.50 m	0.65 m	2.50 m	7.50 m	0.65 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×28)	Średnia arytmetyczna	268	178	75	480	340	101	523	349	102
	Odchylenie standardowe	130	68	20	206	125	36	219	137	35

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 6										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.60 m	2.50 m	7.50 m	0.60 m	2.50 m	7.50 m	0.60 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×27)	Średnia arytmetyczna	170	124	54	333	277	62	290	356	68
	Odchylenie standardowe	62	49	17	122	99	18	99	137	23

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 7										
Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.75 m	2.50 m	7.50 m	0.75 m	2.50 m	7.50 m	0.75 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×12)	Średnia arytmetyczna	172	51	32	212	74	48	347	55	33
	Odchylenie standardowe	124	28	21	105	35	27	225	35	17
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×5)	Średnia arytmetyczna	347	119	67	541	238	107	695	151	90
	Odchylenie standardowe	99	33	14	251	73	20	204	30	20

Źródło: opracowanie własne

Wyniki dla lokalizacji pomiarowej nr 8

Przejazdy pojazdów:		Punkt pomiarowy:								
		Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3	Nr1	Nr2	Nr3
		Odległość punktu pomiarowego od krawędzi jezdni:								
		0.60 m	2.50 m	7.50 m	0.60 m	2.50 m	7.50 m	0.60 m	2.50 m	7.50 m
		Wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3.5 t (×16)	Średnia arytmetyczna	371	176	118	285	100	83	418	186	78
	Odchylenie standardowe	222	106	72	151	45	49	184	89	45
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3.5 t (×4)	Średnia arytmetyczna	621	315	253	603	242	168	579	303	168
	Odchylenie standardowe	242	147	150	108	106	20	64	89	76

Źródło: opracowanie własne

Analiza wyników

Porównując ze sobą uśrednione wartości maksymalnych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z jezdnią o nawierzchni asfaltowej o dobrym (tabela 1 – lokalizacja pomiarowa nr 1) i złym stanie technicznym nawierzchni (tabela 2 – lokalizacja nr 2), należy stwierdzić, że przy porównywalnej średniej prędkości przejazdu pojazdów kołowych wpływ pogarszającego się stanu technicznego nawierzchni na intensyfikację poziomu drgań propagowanych do otoczenia jest bezsporny w każdej z rozpatrywanych w pracy grup pojazdów. W przypadku obciążeń dynamicznych od pojazdów generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych o masie całkowitej do 3.5 t po jezdni z nawierzchnią asfaltową o złym stanie technicznym w pierwszym punkcie pomiarowym (zlokalizowanym najbliżej krawędzi jezdni) odnotowano maksymalne wartości przyspieszeń drgań w kierunku pionowym (kierunek z) aż o 315% większe niż w przypadku maksymalnych przyspieszeń drgań zarejestrowanych w pobliżu drogi o analogicznej konstrukcji, ale z nawierzchnią w dobrym stanie technicznym. W płaszczyźnie poziomej przyrost maksymalnych wartości przyspieszeń drgań w l.p.p. nie był tak istotny i wyniósł odpowiednio 155% w kierunku x (równoległym do osi drogi) i 250% w kierunku y (prostopadłym do osi jezdni). Z jeszcze większym przyrostem maksymalnych wartości przyspieszeń drgań mamy do czynienia w przypadku drgań generowanych przejazdami samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3.5 t, który w bezpośrednim sąsiedztwie drogi (punkt nr 1) wyniósł: 400% – w kierunku pionowym oraz od 240% do 345% – w płaszczyźnie poziomej odpowiednio w kierunku x i kierunku y. Znacznie mniejszy wzrost wartości przyspieszeń drgań stwierdzono w przypadku obciążeń dynamicznych od pojazdów generowanych przejazdami autobusów. W punkcie pomiarowym zlokalizowanym najbliżej krawędzi jezdni (punkt nr 1) maksymalne wartości przyspieszeń drgań wzrosły o 270% – w kierunku pionowym oraz o 25% do 75% – odpowiednio w kierunkach x i y.

Z danych zamieszczonych w tabeli 2 wynika również, że w drugim punkcie pomiarowym (punkt nr 2) – oddalonym

o 2.5 metra od krawędzi drogi z jezdnią o nawierzchni asfaltowej o złym stanie technicznym – mamy do czynienia z jeszcze większą intensywnością drgań w płaszczyźnie poziomej – zwłaszcza w kierunku y, prostopadłym do osi jezdni, niż w pierwszym punkcie pomiarowym (punkt nr 1) usytuowanym w bezpośrednim sąsiedztwie drogi. Przy obciążeniach dynamicznych od pojazdów generowanych przejazdami autobusów maksymalne wartości przyspieszeń drgań w kierunku y rosną w porównaniu z odpowiednimi wartościami wyznaczonymi w przypadku przejazdów tej samej grupy pojazdów po drodze z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym o 635%. W przypadku obciążeń dynamicznych od pojazdów generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich ciężarowych o masie całkowitej do 3.5 t oraz samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3.5 t adekwatne przyrosty amplitud w kierunku y są jeszcze większe i wynoszą odpowiednio: 795% oraz 1435%. Tak gwałtowny wzrost wartości przyspieszeń drgań wraz z odległością od źródła wymuszenia (szczególnie intensywny w płaszczyźnie poziomej w kierunku y) może wskazywać na lokalne niejednorodności gruntu lub istotną zmianę w uwarstwieniu gruntu wzdłuż przyjętego profilu pomiarowego, lecz niewątpliwie na taki stan rzeczy wpłynął również zły stan techniczny nawierzchni, który przyczynił się do propagacji do otoczenia drgań o znacznie bardziej złożonym widmie.

Znacznie mniejszy wpływ pogarszającego się stanu technicznego nawierzchni na poziom drgań propagowanych do otoczenia odnotowano natomiast w przypadku drogi gruntowej z nawierzchnią żwirową (tabela 7 i tabela 8 – odpowiednio lokalizacje pomiarowe nr 7 i nr 8). Zły stan techniczny drogi gruntowej przyczynił się do wzrostu maksymalnych wartości przyspieszeń drgań w kierunku pionowym w punkcie pomiarowym usytuowanym w bezpośrednim sąsiedztwie drogi (punkt nr 1) zaledwie o 115% – w przypadku drgań generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych oraz o 80% w przypadku przejazdów samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3.5 t. W płaszczyźnie poziomej, w tym samym punkcie pomiarowym, przyrosty

przyspieszeń drgań są jeszcze mniejsze i w przypadku pierwszej grupy pojazdów (o masie całkowitej do 3.5 t) wynoszą odpowiednio: 35% – w kierunku x oraz 20% w kierunku y. W przypadku drugiej grupy pojazdów (pojazdy o masie całkowitej powyżej 3.5 t) w kierunku x odnotowano tylko nieznaczny kilkunastoprocentowy przyrost amplitud (10%), podczas gdy w kierunku prostym do osi jezdni (kierunek y) stwierdzono porównywalny spadek wartości amplitud przyspieszeń drgań o 15%. Wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań procentowe różnice pomiędzy uśrednionymi wartościami maksymalnych przyspieszeń drgań rosną – nie przekraczają jednakże wartości 280% w kierunku pionowym w przypadku obu analizowanych grup pojazdów (punkt nr 3) oraz 235% w płaszczyźnie poziomej w kierunku y w przypadku pojazdów o masie całkowitej do 3.5 t (punkt nr 2) i 100% w przypadku samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3.5 t (punkt nr 2).

Co może dziwić, odmienną sytuację zaobserwowano w przypadku lokalizacji pomiarowych usytuowanych w pobliżu dróg z jezdniami o nawierzchniach: betonowej (tabele 3 i 4 – lokalizacje nr 3 i 4) i brukowanej (tabele 5 i 6 – lokalizacje pomiarowe nr 5 i 6). W obu przypadkach mamy do czynienia z istotnym pogorszeniem stanu technicznego nawierzchni (fotografie: 3, 4, 5 i 6), a pomimo to uśrednione maksymalne wartości przyspieszeń drgań w każdej z analizowanych w pracy grup pojazdów charakteryzują się niższymi wartościami w porównaniu z danymi zarejestrowanymi w lokalizacjach pomiarowych usytuowanych w pobliżu dróg o analogicznych konstrukcjach jezdni, ale o zdecydowanie lepszym stanie technicznym nawierzchni.

W przypadku lokalizacji pomiarowych nr 3 i nr 4 – usytuowanych w pobliżu drogi z jezdnią o nawierzchni betonowej, w pierwszym punkcie pomiarowym (punkt nr 1) w kierunku pionowym z odnotowano praktycznie identyczne wartości uśrednionych maksymalnych przyspieszeń drgań generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych (różnica +0.1%). Samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3.5 t generują natomiast o 35% niższe wartości przyspieszeń drgań w przypadku przejazdów nawierzchnią o zdecydowanie gorszym stanie technicznym. W płaszczyźnie poziomej różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami przyspieszeń drgań są jeszcze większe. W przypadku obciążeń dynamicznych generowanych przejazdami pojazdów zaliczanych do pierwszej grupy (o masie całkowitej do 3.5 t) maksymalna wartość przyspieszeń drgań rejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie nawierzchni betonowej o złym stanie technicznym (w punkcie nr 1) obniżyła się w stosunku do analogicznej wartości wyznaczonej w tym samym punkcie pomiarowym dla drogi o średnim stanie technicznym nawierzchni o 30% – w kierunku x oraz o 25% – w kierunku y. W przypadku drugiej grupy pojazdów (o masach całkowitych powyżej 3.5 t) uśrednione wartości maksymalnych przyspieszeń drgań w kierunkach x i y zmniejszyły się odpowiednio o: 70% i 55%.

Procentowe różnice pomiędzy uśrednionymi wartościami maksymalnych przyspieszeń drgań generalnie rosną wraz z odległością od źródła drgań, uzyskując swoje maksimum w najbardziej oddalonym od jezdni trzecim punkcie pomiarowym (punkt nr 3). Maksymalne odnotowane spadki wartości uśrednionych maksymalnych przyspieszeń drgań nie przekraczają 80% w kierunku pionowym oraz 85% w płaszczyźnie poziomej (w kierunku y).

Porównując uśrednione maksymalne wartości przyspieszeń drgań wyznaczonych w przypadku lokalizacji pomiarowych nr 5 i nr 6 – usytuowanych w pobliżu drogi z nawierzchnią brukowaną o średnim (tabela 5) i bardzo złym stanie technicznym nawierzchni (tabela 6) – należy stwierdzić, że podobnie jak w przypadku drogi z nawierzchnią betonową i tutaj mamy do czynienia z istotnymi, chociaż nie aż tak znaczącymi spadkami przyspieszeń drgań spowodowanych pogorszeniem się stanu technicznego nawierzchni. W przypadku obciążeń dynamicznych od pojazdów generowanych ruchem samochodów o masie całkowitej do 3.5 t w pierwszym punkcie pomiarowym (punkt nr 1) odnotowano obniżenie uśrednionych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań o 35% – w kierunku pionowym (z), 30% – w kierunku poziomym równoległym do osi drogi (x) oraz o 45% – w kierunku poziomym prostym do osi drogi (y). Procentowe spadki wartości maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań generalnie nie ulegają znaczącym zmianom wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań i utrzymują się na poziomie nieprzekraczającym 45%.

Niestety w przypadku lokalizacji pomiarowych nr 5 i nr 6, podobnie jak w przypadku lokalizacji pomiarowych usytuowanych w pobliżu drogi gruntowej (punkty nr 7 i nr 8) oraz drogi z jezdnią o nawierzchni betonowej (punkty nr 3 i nr 4) nie było możliwe zarejestrowanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań wygenerowanych przejazdami autobusów. W pierwszym przypadku nie było także możliwości porównania wartości przyspieszeń drgań generowanych przejazdami samochodów ciężarowych.

Biorąc pod uwagę, iż maksymalne błędy wskazań układu pomiarowego złożonego z: 16-bitowego analizatora drgań KSD-400, zestawu niskoczęstotliwościowych piezoelektrycznych czujników przyspieszeń firmy DYTRAN i okablowania – zgodnie z okresowo wystawianymi świadectwami sprawdzenia torów pomiarowych (według przepisów metrologicznych o piezoelektrycznych czujnikach drgań wprowadzonych przez prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 8 czerwca 1995 r. [11]) nie przekraczają kilku procent, prezentowane w niniejszym rozdziale wyniki przeprowadzonych analiz porównawczych zaokrąglono do $\pm 5\%$.

W związku ze znaczną liczbą danych pozyskanych w trakcie przeprowadzonych pomiarów oraz obszernością niniejszej pracy nie było możliwe omówienie szczegółowych wyników analiz struktury częstotliwościowej zarejestrowanych wibrogramów. Analiza rozkładów częstotliwościowych, podobnie jak analiza wpływu rodzaju nawierzchni drogowej na poziom drgań propagowanych do otoczenia, wymaga odrębnego omówienia.

Podsumowanie

Jak wskazują prezentowane w pracy wyniki badań uśrednione wartości maksymalnych przyspieszeń drgań propagowanych do otoczenia z drogi z jezdnią o nawierzchni asfaltowej w złym stanie technicznym (lokalizacja pomiarowa nr 2) przy zbliżonych średnich prędkościach przejazdu pojazdów ruchu lokalnego (wynoszących w lokalizacjach pomiarowych nr 1 i nr 2 odpowiednio: 56 i 57 km/h – w przypadku przejazdu pojazdów o masie całkowitej do 3.5 t oraz odpowiednio 56 i 52 km/h – w przypadku pojazdów o masie całkowitej powyżej 3.5 t), w zależności od kierunku pomiaru i odległości punktu pomiarowego od krawędzi jezdni, mogą być nawet piętnastokrotnie wyższe (maksymalny odnotowany wzrost wartości uśrednionych maksymalnych przyspieszeń drgań w kierunku y w odległości 2.5 metra od krawędzi jezdni wynosi ponad 1435%) od odpowiadających im maksymalnych wartości przyspieszeń drgań rejestrowanych w pobliżu drogi o podobnej konstrukcji, ale z nawierzchnią w dobrym stanie technicznym (lokalizacja nr 1).

W przypadku drogi gruntowej z nawierzchnią żwirową o złym stanie technicznym (lokalizacja nr 8 – w której przypadku nawet w stanie technicznym dobrym poziom drgań propagowanych do otoczenia i tak jest kilkunastokrotnie wyższy niż w przypadku dróg z nawierzchniami bitumicznymi), przy porównywalnej średniej prędkości przejazdu pojazdów ruchu lokalnego (wynoszącej 52 km/h w lokalizacji nr 7 i 53 km/h w lokalizacji nr 8 – dla pojazdów o masie całkowitej do 3.5 t oraz odpowiednio: 57 i 55 km/h – w przypadku pojazdów o masie całkowitej powyżej 3.5 t) odnotowano maksymalnie tylko kilkukrotny wzrost uśrednionych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań (maksymalnie o 280% w kierunku z) w porównaniu z maksymalnymi przyspieszeniami drgań rejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie tej samej drogi, ale na odcinku o nawierzchni, której stan określono jako średni (lokalizacja nr 7).

Odwrotny wpływ pogarszającego się stanu technicznego nawierzchni na poziom drgań propagowanych do otoczenia stwierdzono w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o nawierzchniach betonowej (lokalizacje pomiarowe nr 3 i nr 4) i brukowanej (lokalizacje pomiarowe nr 5 i nr 6). W obu przypadkach wraz z pogorszeniem się stanu technicznego nawierzchni odnotowano znacząco niższe średnie prędkości przejazdu pojazdów ruchu lokalnego, którym towarzyszyły kilkudziesięcioprocentowe spadki uśrednionych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań (maksymalnie o: –85% na drodze z nawierzchnią betonową i o –45% – na drodze brukowanej). W przypadku drogi brukowanej różnica pomiędzy średnimi prędkościami przejazdów samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych po odcinkach dróg o średnim i złym stanie technicznym nawierzchni wyniosła ponad 14 km/h (przy średniej prędkości przejazdu drogą o średnim stanie technicznym nawierzchni wynoszącej 41 km/h). Nieco mniejsze różnice odnotowano w przypadku drogi z jezdnią o nawierzchni betonowej. Wynoszą one odpowiednio: 6 km/h

– w przypadku pojazdów o masie całkowitej do 3.5 t oraz 8 km/h – w przypadku pojazdów o masie całkowitej powyżej 3.5 t (przy średniej prędkości przejazdów drogą o średnim stanie technicznym nawierzchni wynoszącej odpowiednio: 61 km/h i 58 km/h).

Podsumowując, należy stwierdzić, iż przeprowadzone pomiary przyspieszeń drgań propagowanych do otoczenia z drogowych ciągów komunikacyjnych oraz analizy porównawcze uśrednionych wartości z maksymalnych przyspieszeń drgań, które realizowano dla ośmiu lokalizacji pomiarowych usytuowanych w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o nawierzchniach: bitumicznej, betonowej, brukowanej i żwirowej – przy dwóch zróżnicowanych stacjach technicznych nawierzchni i obciążeniach dynamicznych od pojazdów generowanych przejazdami pojazdów kołowych ruchu lokalnego dowodzą, że nie zawsze wraz z istotnym pogorszeniem stanu technicznego nawierzchni mamy do czynienia z intensyfikacją negatywnych oddziaływań parasejsmicznych propagowanych do otoczenia. Istotnego podwyższenia poziomu drgań propagowanych do otoczenia należy się z pewnością spodziewać natomiast wszędzie tam, gdzie nie nastąpi znaczący spadek prędkości przejazdu pojazdów na odcinkach dróg o złym stanie technicznym.

Literatura

1. Ciesielski R., Maciąg E., *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
2. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., *Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach*, ITB, Warszawa, 1993.
3. Chyży T., Czech K.R., Malesza M., Miedziałowski Cz., *Investigations and evaluation of road vibrations influence in historic buildings complex, XIII-th Scientific-Technical Conference REMO 2009. Repair, conservation and strengthening of traditionally erected buildings and historic buildings*, Wrocław – Pałac Wojanów, 2–4 XII 2009.
4. PN-85/B-02170 – *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
5. Instrukcja 348/98. *Diagnostyka dynamiczna i zabezpieczenia istniejących budynków mieszkalnych przed szkodliwym działaniem drgań na właściwości użytkowe budynków*. ITB, Warszawa 1998.
6. Stypuła K., *Rola podłoża gruntowego w przenoszeniu oddziaływań parasejsmicznych na budowle*. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła–Ustroń, 2005.
7. Maciąg E.: *Interakcja układu budynek–podłoże gruntowe w świetle doświadczalnego badania drgań parasejsmicznych*. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2006, nr 4.
8. PN-88/B-02171 – *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.
9. Chyży T., Czech K.R., Miedziałowski Cz.: *Wpływ wybranych czynników na propagację drgań drogowych w obrębie zabytkowego zespołu budynków*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2011, nr 6.
10. Maciąg E., Tatara T., Chelmecki J., *Badania drgań gruntu i niskich budynków od wpływu komunikacji miejskiej*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2005, nr 3.
11. Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa Nr 14. Warszawa, 12 czerwca 1995 r.