

Wpływ rodzaju nawierzchni drogowej i obciążeń dynamicznych od pojazdów na poziom drgań powierzchniowych propagowanych do otoczenia

Krzysztof Robert Czech

W artykule analizowany jest wpływ rodzaju nawierzchni drogowej oraz obciążenia dynamicznego od pojazdów na poziom drgań propagowanych do otoczenia. Pomiar przyspieszeń drgań realizowano w czterech lokalizacjach pomiarowych w bezpośrednim sąsiedztwie dróg z jezdniami o nawierzchniach: bitumicznej, betonowej, brukowej oraz drogi gruntowej o nawierzchni żwirowej. Obciążenie dynamiczne od pojazdów analizowano w trzech grupach: samochody osobowe i dostawcze o masie całkowitej do 3,5 t, samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3,5 t oraz dodatkowo autobusy. Analiza wpływu wyżej wymienionych czynników na poziom drgań generowanych do otoczenia jest prowadzona w oparciu o maksymalne wartości przyspieszeń drgań.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 21.02.2013

data akceptacji do druku: 13.06.2013



dr inż. Krzysztof Czech
Katedra Mechaniki
Konstrukcji,
Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Białostocka
kr.czech@gmail.com

Rozwój przemysłu, nieodłącznie związany ze wzrostem ilości przewożonych towarów i osób, wymaga nie tylko zapewnienia wystarczającej przepustowości dróg w miarę wzrostu intensywności ruchu pojazdów. Wymusza także większe możliwości przewozowe i obciążenia przypadające na osie współcześnie użytkowanych pojazdów ciężarowych, przyczyniając się tym samym do intensyfikacji oddziaływań dynamicznych propagowanych do otoczenia w postaci drgań i wstrząsów.

Drgania drogowe wzbudzone w konstrukcji jezdni i przekazywane drogą gruntową na budynki zlokalizowane w pobliżu mogą powodować, iż między podłożem i fundamentem budynku pojawią się naprężenia kontaktowe wynikające ze wzajemnego oddziaływania na siebie tych elementów. Interakcja dynamiczna układu konstrukcja-podłoże z czasem może prowadzić do nadmiernej koncentracji naprężeń w elementach konstrukcyjnych budynku i zmian zmęczenia materiału oraz deformacji podłoża pod budynkami i w ich bezpośrednim sąsiedztwie. W efekcie w budynkach zlokalizowanych w pobliżu dróg kołowych może dochodzić do zarysowań wypraw i tynków, zarysowań i spękań elementów konstrukcyjnych, a w skrajnych przypadkach nawet do poważnych awarii zagrażających bezpieczeństwu życia ludzkiego. Z tego powo-

du ewentualny wpływ drgań drogowych na budynki powinien być uwzględniany już na etapie ich projektowania.

Generowaniem sił dynamicznych na styku koła pojazdu i nawierzchni jezdni, propagacją i przekazywaniem się drgań drogowych do otoczenia zajmowało się wielu badaczy (m.in.: [1], [2], [5], [10]) próbujących zbadać i opisać istniejące zależności pomiędzy poziomem drgań propagowanych do otoczenia, a m.in.: rodzajem nawierzchni drogowej, jej stanem technicznym, rodzajem podłoża, rodzajem pojazdu wzbudzającego drgania, prędkością jego przejazdu, masą całkowitą pojazdu, obciążeniem przypadającym na oś pojazdu, rodzajem zawieszenia pojazdu, liczbą osi itp. Interesujący przegląd dotychczas prowadzonych badań zamieszczono między innymi w pracach Ciesielskiego i in. [2], [3]. Wpływ wielu z wyżej wymienionych czynników na poziom drgań powierzchniowych propagowanych do otoczenia wymaga jednakże dalszych systematycznych i szczegółowych badań.

Celem niniejszego artykułu jest określenie wpływu rodzaju nawierzchni drogowej i typowych obciążeń dynamicznych od pojazdów na poziom drgań drogowych generowanych ruchem lokalnym i propagowanych do otoczenia - w głównej mierze w postaci fal powierzchniowych Rayleigha [9] (tzw. *R-fal* - płaskich fal harmonicznych rozchodzących się w półprzestrzeni sprężystej równoległe do powierzchni i zanikających asymptotycznie do zera wraz z głębokością [4]).

Lokalizacje pomiarowe

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej wpływu rodzaju nawierzchni drogowej na poziom drgań komunikacyjnych generowanych ruchem lokalnym do otoczenia niezbędne było przeprowadzenie terenowych pomiarów dynamicznych z wykorzystaniem

precyzyjnej aparatury pomiarowej w bezpośrednim sąsiedztwie dróg kołowych charakteryzujących się zróżnicowanym rodzajem nawierzchni. Do dalszych analiz przyjęto cztery lokalizacje pomiarowe usytuowane w pobliżu dróg z jezdniami o nawierzchniach: asfaltowej, betonowej, brukowcowej (z kamienia polnego) oraz żwirowej. W każdej z przyjętych lokalizacji pomiary prowadzono przy obciążeniu dynamicznym generowanym ruchem lokalnym pojazdów (samochody osobowe, dostawcze, lekkie samochody ciężarowe, samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3,5 t, pojazdy komunikacji miejskiej, autobusy dalekobieżne).

Dane związane z przyjętymi lokalizacjami pomiarowymi oraz opisem stanu technicznego nawierzchni zestawiono poniżej:

- lokalizacja pomiarowa Nr 1 - Białystok, ul. Wiadukt - droga z nawierzchnią asfaltową o dobrym stanie technicznym (brak lokalnych nierówności, spękań czy przełomów - fot. 1),
- lokalizacja pomiarowa Nr 2 - Barszczewo koło Białegostoku, ul. Zastawie II - droga z jezdnią o nawierzchni z betonu o średnim stanie technicznym (szczeliny poprzeczne o szerokości dochodzącej do 1,5 cm - praktycznie bez wypełnienia w części górnej; widoczne nieznaczne poprzeczne uszkodzenia nawierzchni, fot. 2),
- lokalizacja pomiarowa Nr 3 - Białystok, ul. Daleka - droga z nawierzchnią brukowcową o średnim stanie technicznym (lokalne nierówności bruku o w miarę jednolitej teksturze i równości ułożenia - fot. 3),
- oraz lokalizacja pomiarowa Nr 4 - ul. Wodociągowa na trasie Krupniki-Klepacze koło Białegostoku - utwardzona droga gruntowa o nawierzchni żwirowej o średnim stanie technicznym (lokalne nierówności i nieznaczne uszkodzenia poprzeczne - sfalowanie nawierzchni w części środkowej - fot. 4).



1. Lokalizacja pomiarowa Nr 1



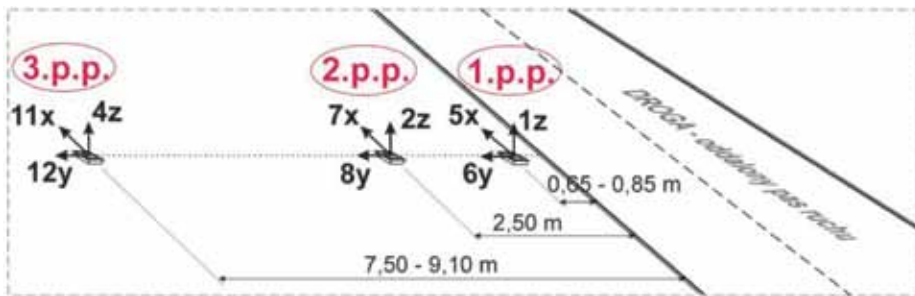
2. Lokalizacja pomiarowa Nr 2



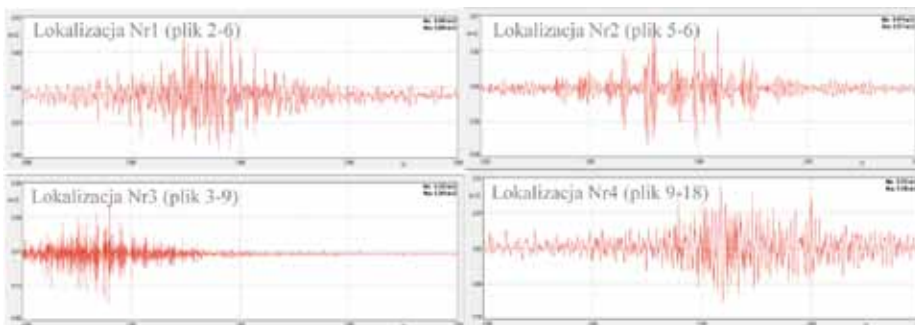
3. Lokalizacja pomiarowa Nr 3



4. Lokalizacja pomiarowa Nr 4



5. Szkic profilu pomiarowego stosowanego w każdej z przyjętych lokalizacji pomiarowych



6. Przykładowe akcelerogramy zarejestrowane w 2.p.p. w kierunku z

Aparatura pomiarowa i rozmieszczenie czujników

Pomiary dynamiczne prowadzono z wykorzystaniem szesnastokanałowego komputerowego analizatora drgań KSD-400 z 16-bitową kartą przetwornika A/D NI USB-6210 firmy National Instruments i wzmacniaczami pomiarowymi współpracującymi z niskoczęstotliwościowymi piezoelektrycznymi czujnikami przyspieszeń drgań firmy Dytran typu 3191A. Zastosowana aparatura pomiarowa umożliwia próbkowanie z częstotliwością od 16 do 100 tys. Hz przy liczbach 4 do 262144 próbek na kanał.

W każdej z przyjętych lokalizacji pomiary realizowano przy wykorzystaniu dziewięciu czujników przyspieszeń (trzech czujników typu 3191A oraz sześciu czujników typu 3187D) przykręconych do metalowych pierścieni z trzema bolcami wbitymi w grunt. Takie rozwiązanie powinno zapewnić lepsze związanie czujników z gruntem, w którym mierzone są drgania [8]. Rejestrację drgań prowadzono z szybkością 1024 próbek na sekundę przy włączonej filtracji antyaliasingowej.

Czujniki pomiarowe każdorazowo rozmieszczano wzdłuż profilu pomiarowych zo-

rientowanych prostopadłe do osi jezdni i złożonych z trzech punktów pomiarowych (p.p.), usytuowanych w następujących odległościach od krawędzi jezdni: 1.p.p. – $0,65 \div 0,85$ m (w zależności od możliwości technicznych pierwszy punkt pomiarowy zawsze przyjmowano jak najbliższej krawędzi jezdni), 2.p.p. – 2,5 m i 3.p.p. – $7,5 \div 9,10$ m. W każdym z punktów pomiarowych rejestrację przyspieszeń prowadzono w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (z – kierunek pionowy, x – kierunek poziomy równoległy do osi jezdni, y – kierunek poziomy prostopadły do osi jezdni). Szkic rozmieszczenia czujników wzdłuż przyjętych profili pomiarowych pokazano na rys. 5.

Wyniki pomiarów

W wyniku prowadzonego monitoringu, w każdej z przyjętych lokalizacji pomiarowych, zarejestrowano od kilkunastu do kilkudziesięciu plików z przebiegami czasowymi przyspieszeń drgań. Łącznie, na potrzeby niniejszego artykułu, przeanalizowano 114 plików, z których każdy zawierał po 9 akcelerogramów. Przykładowe zarejestrowane przebiegi czasowe przyspieszeń drgań pokazano na rys. 6:

W przypadku każdego z zarejestrowanych akcelerogramów wyznaczono maksymalne wartości przyspieszeń drgań w funkcji odległości od krawędzi jezdni i kierunku, w którym drgania były mierzone. W przygotowanym zestawieniu poszczególne wpisy pogrupowano w zależności od rodzaju pojazdu wzbudzającego drgania na:

- samochody osobowe i lekkie samochody ciężarowe o masie całkowitej do 3,5 t,
- samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3,5 t,
- autobusy (komunikacji miejskiej i dalekobieżne).

Dodatkowo w każdej z przyjętych lokalizacji pomiarowych wprowadzono podział ze względu na kierunek ruchu pojazdów (bliższym lub oddalonym od profilu pomiarowego pasem jezdni).

W związku z obszernością opracowanych zestawień w tab. 1 ÷ tab. 4 zamieszczono tylko wybrane, najbardziej charakterystyczne dane z każdej z rozpatrywanych lokalizacji.

Wpływ rodzaju nawierzchni i typu pojazdu na poziom drgań propagowanych do otoczenia

W celu przeanalizowania wpływu rodzaju nawierzchni i typu poruszającego się po niej pojazdu na poziom drgań propagowanych do otoczenia w przypadku każdej z ww. lokalizacji wyznaczono maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w poszczególnych punktach i kierunkach pomiarowych w odniesieniu do poszczególnych grup pojazdów. Uwzględniono przy tym kierunek ruchu pojazdów. Dodatkowo,

Tab.1: Zestawienie przykładowych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 1

Nr pliku	v [km/h]	Drgania wzbudzone przejazdem:	Punkt pomiarowy								
			Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
			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
			Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
			1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]											
SAMOCHODY OSOBOWE I LEKKIE CIĘŻAROWE o masie całkowitej do 3,5 tony											
2-35	50	Przejazd samochodu osobowego z nadwoziem typu SUV	7	7	4	10	7	8	11	9	6
2-36	45	Przejazd samochodu dostawczego z nadwoziem typu VAN furgon (marki VW Transporter)	16	16	5	14	8	7	12	11	10
2-28	60	Przejazd lekkiego samochodu ciężarowego (marki Renault - 2 osie)	26	20	11	21	14	10	13	12	15
SAMOCHODY CIĘŻAROWE o masie całkowitej powyżej 3,5 tony											
2-32	55	Przejazd samochodu ciężarowego skrzyniowego z dźwigiem (marki Volvo - 3 osie)	69	58	21	103	40	18	69	33	24
2-13	65	Przejazd samochodu ciężarowego do przewozu mieszanki betonowej - tzw. betonowozu (marki - DAF - 4 osie)	36	21	16	45	20	14	87	18	16
2-6	65	Przejazd samochodu ciężarowego (ciągnik siodłowy marki Volvo z naczepą - 5 osi - w tym 1 oś uniesiona)	101	66	30	56	38	22	76	36	18
2-21	50	Przejazd samochodu ciężarowego samowyladowczego do przewozu mieszanki mineralno-bitumicznej - bez ładunku (5 osi)	48	35	25	16	14	15	19	18	19
AUTOBUSY											
2-33	70	Przejazd autobusu dalekobieżnego PKS (marki Autosan - 2 osie)	37	23	16	50	16	12	67	30	17
2-2	55	Przejazd autobusu komunikacji miejskiej (marki MAN - 3 osie)	243	85	33	467	62	30	356	101	31

Tab.2: Zestawienie przykładowych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 2

Nr pliku	v [km/h]	Drgania wzbudzone przejazdem:	Punkt pomiarowy								
			Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
			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
			Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
			1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]											
SAMOCHODY OSOBOWE I LEKKIE CIĘŻAROWE o masie całkowitej do 3,5 tony											
5_19	50	Przejazd samochodu osobowego (marki Opel Astra II)	156	121	52	142	66	61	196	34	51
5_20	65	Przejazd samochodu osobowego (marki Ford kombi)	352	191	86	324	114	116	530	86	103
5_17	70	Przejazd samochodu osobowego z nadwoziem typu VAN	300	195	76	338	103	106	619	69	108
SAMOCHODY CIĘŻAROWE o masie całkowitej powyżej 3,5 tony											
5_25	45	Przejazd małego samochodu ciężarowego do przewozu kabin TOI i przepompowywania nieczystości	600	316	152	792	155	176	1382	183	191
5_27	75	Przejazd samochodu ciężarowego do przewozu mieszanek mineralno-bitumicznych (2+2 = 4 osie)	937	480	211	1548	255	259	1842	439	387
5_6	60	Przejazd samochodu ciężarowego skrzyniowego z plandeką (ciągnik siodłowy z naczepą - 2+3 = 5 osi - w tym 1 oś naczepy uniesiona)	1078	527	344	2045	283	306	2156	660	588

w przypadku większej liczby zarejestrowanych przejazdów, obliczono średnie wartości arytmetyczne i wartości odchyłek standardowych, które wskazują jak szeroko są rozrzucone wartości zarejestrowanych maksymalnych przyspieszeń drgań wokół wartości średnich w ramach poszczególnych

grup pojazdów. Uzyskane dane zestawiono w tab. 5 ÷ tab. 8 (w nawiasach zamieszczono informację o liczbie zarejestrowanych akcelerogramów w przypadku danej grupy pojazdów):

Niestety nie we wszystkich przyjętych lokalizacjach pomiarowych możliwe było za-

rejestrwanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań wzbudzonych przejazdami samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t, czy też przejazdami autobusów. Z tego powodu analizę porównawczą przeprowadzono tylko tam gdzie było to możliwe. Przyjęto przy tym, że poziom od-

Tab. 3: Zestawienie przykładowych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 3

Nr pliku	v [km/h]	Drgania wzbudzone przejazdem:	Punkt pomiarowy								
			Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
			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
			Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
			1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]											
SAMOCHODY OSOBOWE I LEKKIE CIĘŻAROWE o masie całkowitej do 3,5 tony											
3-12	30	Przejazd samochodu osobowego z nadwoziem typu SUV (marki Jeep)	178	116	49	345	219	58	392	234	61
3-10	45	Przejazd samochodu osobowego (marki Skoda Octavia kombi)	342	217	83	660	509	112	634	362	107
3-23	60	Przejazd samochodu dostawczego z nadwoziem typu VAN furgon (marki Mercedes Vito) i samochodu osobowego (marki Ford Focus)	474	290	113	896	588	206	762	652	188
3-9	45	Przejazd samochodu osobowego (marki VW Passat)	511	364	103	663	437	153	997	599	155

Tab. 4: Zestawienie przykładowych maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 4

Nr pliku	v [km/h]	Drgania wzbudzone przejazdem:	Punkt pomiarowy								
			Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
			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
			Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
			1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]											
SAMOCHODY OSOBOWE I LEKKIE CIĘŻAROWE o masie całkowitej do 3,5 tony											
9-8	40	Przejazd samochodu osobowego (marki Peugeot Partner)	91	28	18	192	46	33	215	36	22
9-4	40	Przejazd samochodu osobowego z nadwoziem typu VAN (marki VW Transit)	108	37	21	168	57	31	240	42	30
9-12	80	Przejazd samochodu osobowego (marki Volvo V40 kombi)	513	104	76	477	151	109	955	144	58
SAMOCHODY CIĘŻAROWE o masie całkowitej powyżej 3,5 tony											
9-13	70	Przejazd samochodu ciężarowego bez ładunku (marki IVECO - 4 osie)	350	158	84	553	237	123	550	166	94
Przejazdy pojazdów oddalonym pasem ruchu											
9-18	65	Przejazd samochodu ciężarowego z ładunkiem żwiru (marki Iveco - 3 osie)	482	151	78	956	352	131	862	186	112

niesienia stanowiąc będą maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z nawierzchnią asfaltową.

Porównanie maksymalnych zarejestrowanych wartości przyspieszeń drgań w ramach poszczególnych grup pojazdów (tab. 5 do tab. 7) w sposób jednoznaczny wskazuje, że wartości najniekorzystniejsze każdorazowo występują przy przejazdach pojazdów bliższym pasem jezdni. Inny rozkład najniekorzystniejszych wartości odnotowano w lokalizacji pomiarowej Nr 4 (tab. 8), w której w trakcie prowadzonych pomiarów zarejestrowano tylko jeden przypadek przejazdu samochodu ciężarowego o masie całkowitej powyżej 3,5 t bliższym pasem jezdni i cztery generowane przejazdami samochodów ciężarowych o analogicznych masach, ale środkiem oraz oddalonym pasem jezdni. Okazało się, że najniekorzystniejsze wartości przyspieszeń drgań zarejestrowano w trak-

cie pomiarów prowadzonych przy przejazdach samochodów ciężarowych środkiem i oddalonym pasem jezdni. Z tego powodu w dalszej części artykułu właśnie te wartości będą podlegały analizie.

Analiza maksymalnych wartości przyspieszeń drgań gruntu (a_{max}) generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych o masie całkowitej do 3,5 t po drodze z jezdnią o nawierzchni asfaltowej (lokalizacja Nr 1) wskazuje na zbliżony, bardzo niski poziom wartości maksymalnych przyspieszeń drgań rejestrowanych w pobliżu krawędzi drogi we wszystkich trzech analizowanych kierunkach pomiarowych (około 30 mm/s²). Nieznacznie większe wartości a_{ymax} stwierdzono w kierunku poziomym prostopadłym do osi drogi (kierunek y).

Porównanie wartości maksymalnych przyspieszeń a_{max} , zarejestrowanych w pozostałych lokalizacjach w trakcie przejazd-

dów samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych o masie całkowitej do 3,5 t, wskazuje na propagację do otoczenia drgań o znacznie większej intensywności. W przypadku drogi z nawierzchnią z betonu (lokalizacja Nr 2) maksymalne wartości przyspieszeń drgań gruntu zarejestrowane w pierwszym punkcie pomiarowym (1.p.p.) są nawet kilkunastokrotnie większe (ponad czterastokrotnie dla składowych pionowych prostopadłych do osi drogi – tzw. składowych radialnych) niż w przypadku wartości a_{max} - rejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z nawierzchnią asfaltową. W przypadku utwardzonej drogi gruntowej z nawierzchnią żwirową (lokalizacja Nr 4) maksymalne przyspieszenia składowych pionowych i poziomych x (równoległych do osi drogi) drgań gruntu w 1.p.p. wykazują ponad szesnastokrotny wzrost wartości w stosunku do drgań rejestrowanych w pobliżu drogi z nawierzchnią asfalto-

Tab. 5: Zestawienie maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 1

Drgania wzbudzone przejazdami:		Punkt pomiarowy								
		Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
		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
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
		1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
		Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t (x8)	średnia arytm. (odch.stand.)	18 (8)	16 (6)	7 (3)	15 (7)	10 (2)	9 (1)	22 (13)	12 (3)	10 (3)
	wartość maksymalna	31	24	13	29	14	11	42	19	15
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x4)	średnia arytm. (odch.stand.)	7 (2)	7 (2)	7 (4)	8 (1)	9 (1)	8 (2)	8 (1)	10 (1)	9 (1)
	wartość maksymalna	9	10	13	8	10	11	9	10	10
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t (x13)	średnia arytm. (odch.stand.)	50 (23)	36 (15)	20 (7)	38 (25)	23 (9)	16 (3)	52 (28)	24 (9)	22 (8)
	wartość maksymalna	101	66	34	103	40	22	102	41	38
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x10)	średnia arytm. (odch.stand.)	21 (10)	18 (12)	10 (4)	17 (14)	12 (6)	11 (2)	25 (24)	13 (3)	14 (5)
	wartość maksymalna	48	52	18	54	29	14	91	21	21
Przejazdy AUTOBUSÓW (x2)	wartość maksymalna	243	85	33	467	62	30	356	101	31
Przejazdy AUTOBUSÓW oddalonym jezdni (x4)	średnia arytm. (odch.stand.)	10 (4)	10 (2)	7 (2)	10 (2)	9 (1)	9 (1)	12 (4)	10 (1)	9 (1)
	wartość maksymalna	13	11	9	11	10	10	17	12	10

Tab. 6: Zestawienie maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 2

Drgania wzbudzone przejazdami:		Punkt pomiarowy								
		Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
		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
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
		1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
		Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t (x10)	średnia arytm. (odch.stand.)	229 (63)	150 (30)	64 (12)	266 (84)	81 (16)	87 (17)	441 (123)	62 (17)	75 (19)
	wartość maksymalna	352	195	86	394	114	116	619	87	108
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x6)	średnia arytm. (odch.stand.)	196 (65)	99 (16)	59 (10)	130 (27)	44 (5)	48 (4)	136 (42)	54 (18)	70 (12)
	wartość maksymalna	270	113	78	171	50	53	207	78	89
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t (x8)	średnia arytm. (odch.stand.)	882 (221)	465 (106)	244 (81)	1552 (626)	251 (79)	263 (96)	1935 (227)	466 (235)	429 (257)
	wartość maksymalna	1078	527	344	2156	308	306	2156	660	588
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x4)	średnia arytm. (odch.stand.)	478 (123)	330 (84)	135 (22)	336 (135)	138 (38)	144 (23)	620 (248)	339 (112)	186 (47)
	wartość maksymalna	600	396	159	490	175	164	877	430	250

wą. Dla składowych radialnych wzrost $a_{y_{max}}$ jest jeszcze bardziej intensywny (ponad dwudziestokrotny). Jednakże najniekorzystniejsze wartości przyspieszeń drgań gruntu są propagowane do otoczenia z drogi

o nawierzchni brukowcowej (lokalizacja Nr 3), w której pomimo istotnie niższej średniej prędkości przejazdu samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych, odnotowano od ponad szesnastu do trzy-

dziestu jeden razy większe wartości maksymalnych przyspieszeń drgań gruntu w 1.p.p. Wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań różnice pomiędzy a_{max} znacząco maleją (są od kilkakrotnie, do co najwy-

Tab. 7: Zestawienie maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 3

Drgania wzbudzone przejazdami:		Punkt pomiarowy								
		Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
		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
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
		1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
		Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t (x16)	średnia arytm. (odch.stand.)	354 (104)	217 (60)	82 (19)	598 (184)	408 (110)	114 (38)	654 (186)	423 (126)	118 (36)
	wartość maksymalna	511	364	113	898	588	206	997	652	188
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x12)	średnia arytm. (odch.stand.)	153 (40)	125 (32)	65 (17)	322 (104)	250 (82)	84 (24)	349 (110)	251 (75)	80 (20)
	wartość maksymalna	215	166	96	432	363	113	476	353	120

Tab. 8: Zestawienie maksymalnych wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w lokalizacji pomiarowej Nr 4

Drgania wzbudzone przejazdami:		Punkt pomiarowy								
		Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 1	Nr 2	Nr 3
		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
		Kierunek z			Kierunek x			Kierunek y		
		1z	2z	4z	5x	7x	11x	6y	8y	12y
		Maksymalne wartości przyspieszeń drgań [mm/s ²]								
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t (x7)	średnia arytm. (odch.stand.)	192 (153)	55 (33)	34 (26)	246 (112)	80 (38)	50 (31)	410 (265)	66 (41)	34 (15)
	wartość maksymalna	513	104	76	477	151	109	955	144	58
Przejazdy samochodów OSOBOWYCH i LEKKICH CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej do 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x5)	średnia arytm. (odch.stand.)	143 (73)	44 (21)	28 (16)	165 (83)	67 (31)	44 (25)	260 (131)	40 (18)	33 (22)
	wartość maksymalna	238	73	52	286	101	79	393	68	69
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t (x1)	wartość maksymalna	350	158	84	553	237	123	550	166	94
Przejazdy samochodów CIĘŻAROWYCH o masie całkowitej powyżej 3,5 t oddalonym pasem jezdni (x4)	średnia arytm. (odch.stand.)	347 (114)	109 (29)	62 (12)	538 (290)	238 (85)	103 (21)	732 (216)	147 (33)	89 (23)
	wartość maksymalna	482	151	78	956	352	131	887	186	112

żej kilkunastokrotnie wyższe od maksymalnych przyspieszeń drgań rejestrowanych w pobliżu drogi z nawierzchnią asfaltową). Wyjątkiem jest droga z nawierzchnią brukowaną, w której przypadku wygenerowane drgania są bardzo intensywne i propagują się na znacznie większe odległości od źródła drgań.

Przyjmując, analogicznie jak poprzednio, za poziom odniesienia najniekorzystniejsze wartości przyspieszeń drgań gruntu zarejestrowane w trakcie przejazdów samochodów osobowych i lekkich ciężarowych po drodze o nawierzchni asfaltowej należy stwierdzić, że samochody ciężarowe o masie całkowitej powyżej 3,5 t w bezpośrednim sąsiedztwie lokalizacji Nr 1 (1.p.p.) generują ponad trzykrotnie większe wartości maksymalnych przyspieszeń drgań gruntu w kierunkach: pionowym z i poziomym x oraz ponad dwukrotnie w kierunku radialnym y.

W przypadku lokalizacji Nr 4 (droga gruntowa o nawierzchni żwirowej) w 1.p.p. odnotowano ponad piętnastokrotny wzrost wartości a_{zmax} (składowa pionowa) i aż trzydziestotrzykrotny wzrost wartości a_{ymax} (składowa radialna) w porównaniu z poziomem drgań generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich ciężarowych po drodze o nawierzchni asfaltowej. Jeszcze większy przyrost wartości maksymalnych przyspieszeń drgań stwierdzono w lokalizacji Nr 2 (droga z nawierzchnią betonową), w której przypadku, w 1.p.p. odnotowano prawie trzydziestopięciokrotny wzrost wartości a_{zmax} i ponad siedemdziesięciokrotny wzrost wartości a_{ymax} w stosunku do maksymalnych wartości uzyskanych w lokalizacji pomiarowej Nr 1 przy wzbudzaniu drgań przejazdami samochodów osobowych i lekkich ciężarowych. Wraz ze wzrostem odle-

głości od źródła drgań w każdej z przyjętych lokalizacji pomiarowych znacząco maleją nie tylko wartości maksymalnych amplitud wszystkich składowych drgań (a_{max}) - istotnie zmniejszają się również różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami rejestrowanymi w lokalizacjach Nr: 2 i 4, i tymi, które zarejestrowano w lokalizacji pomiarowej Nr 1.

Analiza poziomu drgań generowanych przejazdami autobusów po drodze z jezdnią o nawierzchni asfaltowej (lokalizacja Nr 1) wskazuje na jeszcze większy przyrost maksymalnych wartości przyspieszeń drgań niż w przypadku drgań generowanych przejazdami ciężkich, wieloosiowych samochodów ciężarowych o masie całkowitej przekraczającej 3,5 t. W opisywanym przypadku, w porównaniu z przejazdami samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych, w 1.p.p. odnotowano w przybliżeniu

ośmiokrotny wzrost maksymalnych wartości przyspieszeń składowych pionowych drgań (a_{zmax}) i składowych radialnych (a_{ymax}), podczas gdy składowe poziome drgań gruntu w kierunku x (równoległym do osi drogi) wzrosły aż szesnastokrotnie. Niestety, w związku z brakiem analogicznych danych w pozostałych lokalizacjach pomiarowych, nie ma możliwości porównania wartości a_{max} generowanych przejazdami autobusów z danymi uzyskanymi dla innych analizowanych w artykule lokalizacji.

W związku ze znaczną liczbą danych pozyskanych w trakcie przeprowadzonych pomiarów oraz obszernością niniejszego artykułu omówienie szczegółowych wyników analiz struktury częstotliwościowej zarejestrowanych wibrogramów wymaga odrębnego opracowania.

Prognozowany wpływ drgań drogowych na budynki

Zgodnie z normą PN-85/B-02170 [12] „obciążenie budynku wywołane drganiami przekazywanymi na budynek przez podłoże może być w obliczeniach pomijane w tych przypadkach, gdy udział tego obciążenia w całości obciążeń zmiennych działających na konstrukcję jest znikomy”. W przybliżeniu można przyjąć, że z taką sytuacją mamy do czynienia, gdy amplituda przyspieszeń ruchu poziomego podłoża w miejscu posadowienia budynku jest mniejsza od wartości $a_p \leq 0,005g \approx 5 \text{ cm/s}^2$. Analizując pod tym kątem najniekorzystniejsze wartości zarejestrowanych przyspieszeń drgań w poszczególnych lokalizacjach (tab. 5 do tab. 8) należy stwierdzić, że wpływ dodatkowych obciążeń budynku wywołanych drganiami drogowymi mógłby być pominięty w obliczeniach wyłącznie w lokalizacji Nr 1: na całej rozpatrywanej długości pomiarowej w przypadku przejazdów samochodów osobowych i lekkich ciężarowych; w odległościach większych niż 2,5 m od krawędzi jezdni w przypadku przejazdów samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t oraz orientacyjnie przy odległościach większych niż 5,0 m w przypadku przejazdów autobusów. W każdym innym przypadku wpływ dodatkowych obciążeń powodowanych drganiami przekazywanymi na budynek przez podłoże powinien zostać uwzględniony w obliczeniach.

Konieczność uwzględnienia dodatkowych obciążeń zmiennych w obliczeniach budynku od obciążeń dynamicznych nie przesądza o szkodliwości wpływu zarejestrowanych drgań drogowych na analizowane budynki w stadium projektowania. Dotychczasowe badania (m.in.: [2], [6], [7], [8]) generalnie wskazują, iż drgania gruntu generowane przejazdami samochodów ciężarowych i autobusów przenoszą się na fundamenty budynków bez znaczących zmian

w zakresie dominujących częstotliwości (gdyż są one zazwyczaj bliskie podstawowym rezonansowym częstotliwościom drgań budynków) - jednakże na styku podłoże gruntowe - budynek dochodzi do znacznej redukcji intensywności drgań. Budynek zachowuje się jak filtr dolnoprzepustowy [9]. Największej redukcji podlegają składowe poziome drgań gruntu charakteryzujące się wysokimi częstotliwościami. W znacznie mniejszym stopniu redukcji ulegają składowe pionowe drgań gruntu [8]. Dlatego też chcąc posłużyć się zarejestrowanymi przebiegami drgań gruntu do określenia wymuszenia kinematycznego drgań budynków należałoby uwzględnić zmiany zachodzące w wartościach amplitud w poszczególnych pasmach częstotliwości, gdyż nieuwzględnienie tych zmian może prowadzić do przewymiarowania konstrukcji [9]. Jednakże, cytując za Ciesielskim i in. [3], w przypadku prognozowania wpływu drgań na budynki „przyjęcie drgań fundamentu jako identycznych z drganiami podłoża jest najczęściej przyjmowanym przybliżeniem po stronie pewności”.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzenie analizy porównawczej wpływu rodzaju nawierzchni i obciążenia dynamicznego od pojazdów na poziom drgań drogowych propagowanych drogą gruntową do otoczenia wymagało przeanalizowania ponad 1026 przebiegów czasowych przyspieszeń drgań (114 plików \times 3 punkty pomiarowe \times 3 akcelerogramy z trzech wzajemnie prostopadłych kierunków pomiarowych). Pomiar przyspieszeń drgań prowadzono w czterech zróżnicowanych lokalizacjach różniących się rodzajem nawierzchni jezdni (asfaltowa, betonowa, brukowcowa oraz żwirowa). W każdej z przyjętych lokalizacji rejestrowano przebiegi drgań gruntu w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (x, y, z) w punktach pomiarowych zlokalizowanych na gruncie wzdłuż przyjętych profili pomiarowych zorientowanych prostopadle do osi jezdni.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów i analizy porównawczej uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- najniekorzystniejszą z punktu widzenia wartości maksymalnych przyspieszeń drgań propagowanych drogą gruntową do otoczenia okazała się nawierzchnia brukowcowa (maksymalne wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych przy przejazdach samochodów osobowych i lekkich ciężarowych o masie całkowitej do 3,5 t przekraczają poziom przyspieszeń drgań zarejestrowanych przy analogicznym obciążeniu dynamicznym od pojazdów i rejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi (1.p.p.) z nawierzchnią asfaltową ponad trzydziestokrotnie - w kierunku poziomym równoległym do osi dro-

gi x oraz ponad szesnastokrotnie - w kierunku pionowym z),

- mniejszy, aczkolwiek również bardzo intensywny przyrost maksymalnych wartości przyspieszeń drgań w stosunku do drgań generowanych w drodze z nawierzchnią asfaltową stwierdzono w bezpośrednim sąsiedztwie drogi z jezdnią o nawierzchni betonowej (ponad czterdziestokrotnie w kierunku poziomym y - przy przejazdach samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3,5 t oraz ponad siedemdziesięciokrotnie - przy przejazdach samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t),
- zdecydowanie niższy poziom drgań jest propagowany do otoczenia z utwardzonej drogi gruntowej z nawierzchnią żwirową, w której odnotowano wprawdzie, co najmniej szesnastokrotnie większe maksymalne wartości przyspieszeń drgań generowanych przejazdami samochodów osobowych i lekkich ciężarowych w porównaniu do wartości rejestrowanych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi o nawierzchni asfaltowej, ale w przypadku przejazdów samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t w pobliżu drogi stwierdzono także dużo niższy poziom drgań, niż w przypadku drgań generowanych w pobliżu drogi z nawierzchnią betonową,
- wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań, składowe poziome przyspieszeń drgań (zwłaszcza w kierunku prostopadłym do drogi y) stają się dominujące,
- podobnie jak w badaniach [2] - nie zaobserwowano sumowania się drgań w przypadku przejazdu pojazdów obok siebie. Nie stwierdzono także podobnego wpływu przy przejeździe ciągu pojazdów poruszających się w tym samym kierunku - niezależnie czy są to przejazdy samochodów osobowych, czy też samochodów ciężarowych,
- porównując najniekorzystniejsze wartości przyspieszeń drgań zarejestrowanych w płaszczyźnie poziomej w poszczególnych lokalizacjach pomiarowych z wartością normową $a_p = 0,005g$ (zgodnie z p. 4.3 normy [12]) należy stwierdzić, iż wpływ dodatkowych obciążeń budynku wywołanych drganiami drogowymi należałoby bezwzględnie uwzględnić we wszystkich rozpatrywanych lokalizacjach pomiarowych za wyjątkiem lokalizacji Nr 1, w której wpływ dodatkowych obciążeń budynku powinien być uwzględniany w odległościach do 2,5 m od krawędzi jezdni - w przypadku przejazdów samochodów ciężarowych o masie całkowitej powyżej 3,5 t oraz orientacyjnie przy odległościach mniejszych od 5,0 m - w przypadku przejazdów autobusów. ◀

Materiały źródłowe do niniejszego artykułu zestawione są na stronie 25.