

DAMIAN BĘBEN¹⁾

BADANIA DOŚWIADCZALNE KOLEJOWEGO PRZEPUSTU Z BLACH FALISTYCH POD OBCIĄŻENIEM EKSPLOATACYJNYM PRZY WYKORZYSTANIU RADARU INTERFERENCYJNEGO

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych pod obciążeniem eksploatacyjnym kolejowego przepustu wykonanego ze stalowych blach falistych. Do pomiaru przemieszczeń przepustu wykorzystano mikrofalowy radar interferencyjny. Na podstawie pomiaru przemieszczeń, częstotliwości przepustu określono wykorzystując metodę FDD (ang. *Frequency Domain Decomposition*). Obciążenie dynamiczne było wywoływane przez przejazdy różnego typu pociągów kursujących na tej linii. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być pomocne w pomiarach z wykorzystaniem metody interferometrii mikrofalowej, ze szczególnym uwzględnieniem przepustów i innych obiektów mostowych o małych i średnich rozpiętościach teoretycznych.

1. WSTĘP

Zazwyczaj badania dynamiczne i statyczne mostów czy też przepustów wykonywane są w celu potwierdzenia założeń projektowych lub w celu ustalenia konieczności wykonania prac utrzymaniowych i modernizacyjnych (pomiaru diagnostyczne). Takie badania doświadczalne są zwykle wykonywane przy użyciu akcelerometrów, tensometrów, czujników indukcyjnych i zegarowych. Realizacja pomiarów tymi czujnikami pozwala z reguły uzyskać wyniki na odpowiednim poziomie dokładności.

¹⁾ dr inż. – Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej

Jednakże w wielu przypadkach występują trudności w bezpośrednim dostępie do badanej konstrukcji w celu ich montażu i wymaga się zastosowania rusztowań. Z tego też powodu zastosowanie radaru interferencyjnego może okazać się dobrą alternatywą.

Radar interferencyjny jest precyzyjnym mikrofalowym instrumentem odpowiednim do bezkontaktowego monitorowania przemieszczeń i drgań różnych konstrukcji inżynierskich. Wysoka dokładność i szybkość pomiarów to jedne z głównych zalet tego urządzenia. Porównanie wyników pomiarów mostów realizowanych przy pomocy radaru i konwencjonalnych urządzeń pomiarowych zostało przedstawione m.in. w pracach [1 - 3]. Różnice w otrzymanych wynikach były na poziomie jednej dziesiątej milimetra. Metoda interferencji mikrofalowej jest wykorzystana do pomiarów różnych konstrukcji inżynierskich (masztów, kominów, zapór, mostów wiszących, itp.) poddawanych obciążeniom statycznym i dynamicznym [4 - 10].

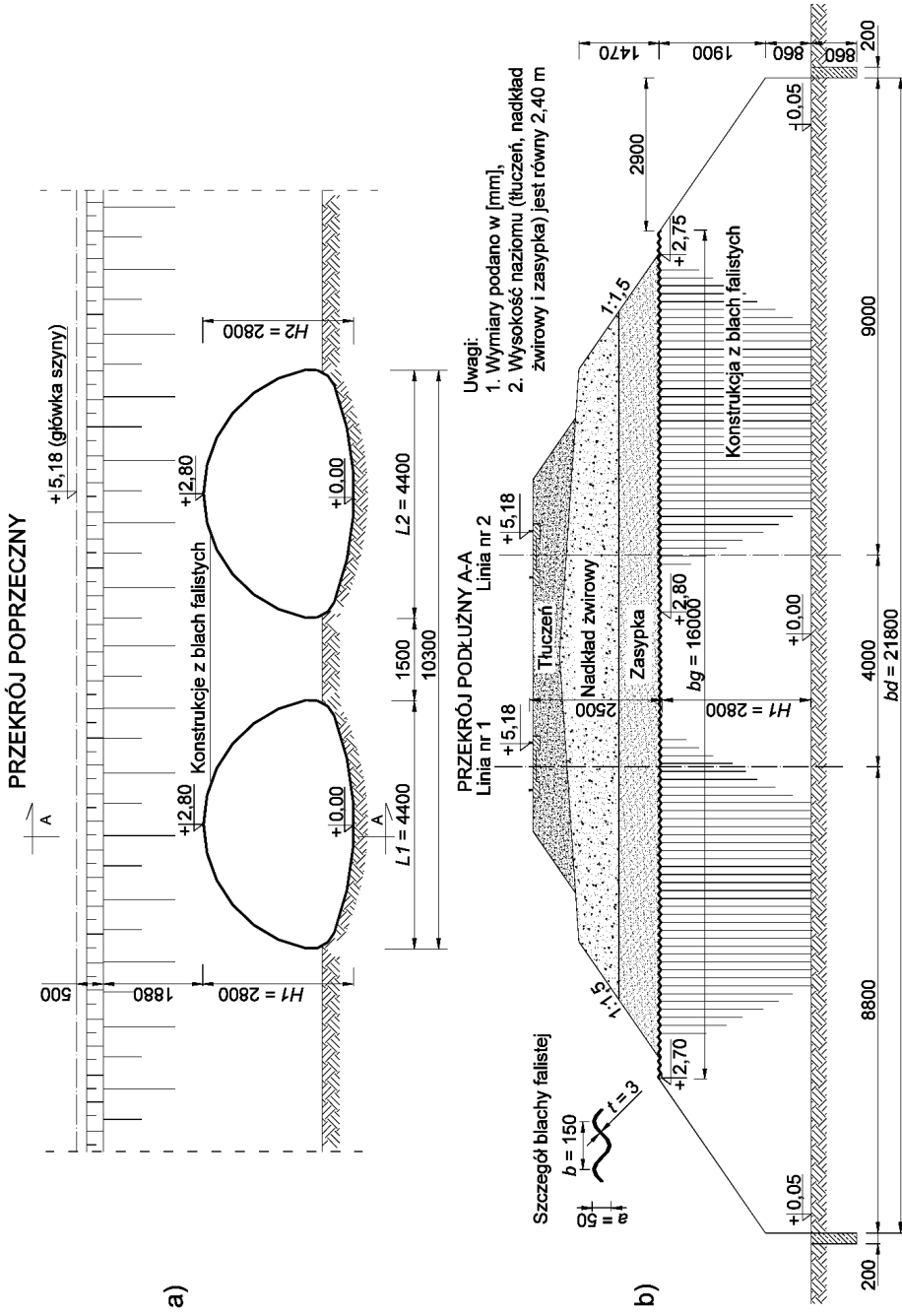
Głównym celem artykułu jest przedstawienie możliwości pomiaru przemieszczeń przepustu kolejowego wykonanego ze stalowych blach falistych z wykorzystaniem radaru interferencyjnego. Przemieszczenia i częstotliwości drgań zostały ustalone dla wszystkich przejeżdżających pociągów w ciągu 24 godzin (badania eksploatacyjne). W celu wyznaczenia częstotliwości drgań przepustu, uzyskane przemieszczenia poddano analizie metodą Frequency Domain Decomposition (FDD) [12]. W badaniach została wykorzystana specjalnie skonstruowana przekładnia z powodu nie spełnienia typowych warunków pomiarowych dla radaru interferencyjnego.

2. OPIS PRZEPUSTU

Badany obiekt kolejowy w przekroju poprzecznym ma dwa przęsła o kształcie łukowo-kołowym. Rozpiętość teoretyczna powłok wynosi $L1 = L2 = 4400$ mm. Są one ułożone bezpośrednio na specjalnie wyprofilowanej podbudowie z gruntu o grubości około 0,20 m i zagęszczonej do wskaźnika zagęszczenia $I_D = 0,98 - 0,95$ zgodnie ze skalą Proctora Normalnego (rys. 1).

Obie konstrukcje stalowe powłok złożone są z elementów blach falistych. Głębokość fali wynosi $a = 50$ mm, a jej długość $b = 150$ mm, przy grubości blach wynoszącej $t = 3$ mm. Poszczególne elementy blach falistych połączono między sobą z wykorzystaniem śrub sprężających $\phi = 20$ mm. Złożone powłoki zostały obsypane warstwami gruntu o grubościach 0,20 - 0,30 m i następnie odpowiednio zagęszczonego (min. $I_D = 0,95$). Wysokość naziomu nad stalowymi konstrukcjami powłok wynosi 2400 mm.

Szerokość przepustu górą wynosi $b_g = 16000$ mm, a dołem $b_d = 21800$ mm. Wysokość obu powłok jest taka sama i wynosi $H1 = H2 = 2800$ mm. W planie obiekt położony jest prostopadle do linii kolejowej. Na obiekcie znajdują się dwa tory kolejowe (tor nr 1 jest zelektryfikowany – rys. 1).



Rys. 1. Kolejowy przepust z blach falistych: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny A-A [3]
 Fig. 1. The corrugated plate railway culvert: a) cross section, b) longitudinal section A-A [3]

3. OPIS RADARU INTERFERENCYJNEGO

Prace pomiarowe były wykonywane z zastosowaniem mikrofalowego radaru interferencyjnego (model IBIS-S) składającego się urządzenia zasilającego, komputera, radaru i anten (nadawczych i odbiorczych).

Radar interferencyjny IBIS-S o zasięgu 1000 m przeznaczony jest do pomiaru i analizy szybko zmieniających się przemieszczeń i drgań konstrukcji. System interferencyjny wykonuje precyzyjny pomiar zmian fazy odbitego sygnału w stosunku do wysyłanego. W typowych warunkach pomiaru, radar ma następujące cechy: rozdzielczość w zakresie 0,50 m, dokładność pomiaru przemieszczenia 0,01 mm, częstotliwość próbkowania do 200 Hz. Należy zauważyć, że badany obiekt może znajdować się maksymalnie 4000 m od urządzenia. Rozdzielczość pikseli zostaje osiągnięta, gdy zmiany odległości wynoszą 0,50 - 0,75 m, a azymut jest równy 4,5 mrad.

Źródła położone w jednym sektorze pozostają nierozróżnialne. Każda z powtarzanych nieprzerwanie emisji sekwencji 256 kolejnych sygnałów trwa 0,005 s. Tak więc możliwa jest rejestracja położenia punktów o dominujących odbiciach w każdym sektorze z częstotliwością 200 Hz i tym samym wykrywanie ich drgań o częstotliwości do 100 Hz.

Podstawą urządzenia jest radar pracujący w dozwolonym na terenie UE paśmie Ku (17,1 - 17,3 GHz, fala z zakresu 17,2 - 17,4 mm). Instrument emituje w kierunku badanego obiektu spójną wiązkę mikrofalową o bardzo małej mocy i skokowo zmiennej częstotliwości, a następnie odbiera, rejestruje i analizuje odbity sygnał. Wbudowany układ interferencyjny wykonuje precyzyjny pomiar zmian fazy sygnału odbitego względem sygnału nadawanego. Dzięki skokowej zmianie częstotliwości (zakres 17,1 - 17,3 GHz jest dzielony na 256 przedziałów o liniowo wzrastającej częstotliwości) radar rozróżnia źródła odbitego sygnału według ich odległości od instrumentu, dzieląc tę odległość na sektory (ang. *bin*) o długości 0,5 m.

W przypadku zastosowania reflektorów mikrofalowych dających jednoznaczne odbicie, wysoka częstotliwość emitowanego sygnału pozwala na rejestrację przemieszczeń nawet rzędu 1 μ m. Jednakże z praktycznego punktu widzenia przyjmuje się, że dokładność wyznaczanych przemieszczeń jest rzędu 0,01 mm (przy odległości od radaru nieprzekraczającej 500 m).

Szczegółowe zasady działania radaru interferencyjnego, jak również podstawy teoretyczne interferometrii mikrofalowej zostały opisane m.in. w pracach [3], [5], [11].

4. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

Jak wynika z powyższego opisu, mikrofalowy radar interferencyjny wykrywa i rejestruje przemieszczenia reflektora tylko w kierunku radialnym. Wysoka dokładność pomiaru uzasadnia praktyczne wykorzystanie również danych pozyskanych w warunkach, w których badany ruch nie będzie równoległy do osi wiązki mikrofal, jeśli tylko zmiana odległości radialnej będzie nie mniejsza niż 10% rzeczywistego

przemieszczenia. Oznacza to, że kąt między kierunkiem osi wiązki mikrofal a kierunkiem badanego przemieszczenia nie powinien przekraczać 84° .

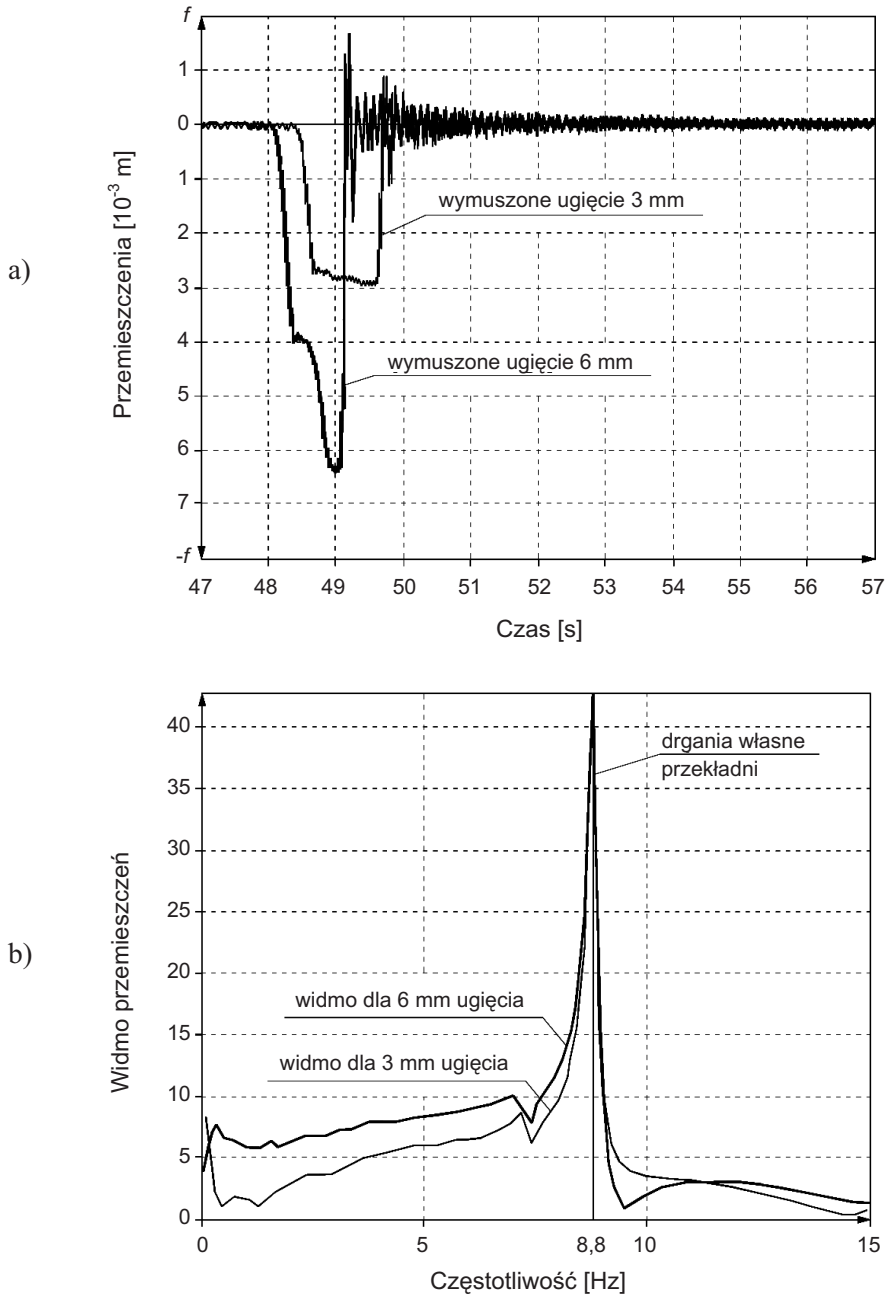
W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych, odległość od radaru do reflektora mikrofalowego wynosiła 14,5 m ("bin" 34). Instrument prowadził rejestrację z częstotliwością 94,26 Hz dla wszystkich sektorów aż do odległości 30 m (a więc dla 60 sektorów). Był to kompromis między spodziewanym zakresem częstotliwości drgań (na etapie opracowania okazało się, że częstotliwości nie przekroczyły 15 Hz) a ilością rejestrowanych danych.

Jednakże typowe warunki dla pomiarów radarowych nie mogły być spełnione w przypadku tego przepustu. Tak więc należało zastosować specjalną przekładnię [3]. Dzięki temu mechanizmowi, pionowe przemieszczenia przepustu były przekształcane na przemieszczenia poziome. W wyniku wstępnych badań kontrolnych w laboratorium i w terenie stwierdzono, że specjalnie skonstruowany mechanizm funkcjonował w sposób zadowalający i nie wpływał zasadniczo na główne wyniki pomiarów.

Badany przepust kolejowy został wykonany ze stalowych blach falistych (długość fali 150 mm). Taki kształt konstrukcji mógł potencjalnie spowodować powstanie wielopowierzchniowych odbić sygnału i w efekcie zagłuszenie sygnału pomiarowego, odbitego od reflektora. W celu zmniejszenia ryzyka zagłuszenia sygnału, wiązkę pomiarową mikrofal umieszczono maksymalnie w poziomie, tj. możliwie blisko osi przepustu. Dodatkowo zastosowano specjalistyczne rożki mikrofalowe typu IBIS-H23 o maksymalnym zysku 23 dBi jako anteny interferometru (nadawczą i odbiorczą). Następnie należało utworzyć wiązkę pomiarową o najmniejszej rozwartości: dla -3 dB jest to 10° w pionie i 11° w poziomie, co odpowiada szerokości wiązki 2,9 m na odległości 16,5 m (sektor 34) od interferometru do reflektora. W trakcie pomiarów okazało się, że sygnał odbity od reflektora znacząco dominował nad szumem kreowanym przez inne źródła [3].

W sposób doświadczalny ustalono także charakterystyki dynamiczne przekładni i reflektora. To był niezwykle ważny problem, ponieważ konieczne było rozróżnienie charakterystyk dynamicznych przekładni i przepustu. W tym celu przeprowadzono wstępne testy w kilku próbach polegające na sztucznym wzbudzeniu drgań poprzez niewielkie, kilkumilimetrowe wciśnięcie pręta pionowego. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach uzyskano niemal identyczne wyniki, tj. występowanie tych samych częstotliwości i podobnego przebiegu tłumienia.

Wstępne badania przeprowadzono w następujący sposób. Pionowe ramię przekładni (pręt stalowy) został dociśnięty przez ciężar własny reflektora (przekładnia działała jak dźwignia) do korony przepustu. Następnie wykonano sztuczne przemieszczenia wciskając pręt na 6 mm i 3 mm (rys. 2a), po czym ramię przekładni było zwalniane. Pionowe ramię (pręt) uderzając o konstrukcję stalową powłoki powodował sekwencję drgań poziomego ramienia, do którego przymocowano reflektor. Częstotliwości były równe 8,8 Hz (rys. 2b) i były one tłumione po około 5 s. Dlatego też, w głównym badaniu przemieszczeń spowodowanych przez przejeżdżające pociągi, częstotliwości w zakresie od 8,5 do 10,0 Hz były uważane za częstotliwość własną drgań systemu przekładnia - reflektor.



Rys. 2. Badania wstępne ugięć w celu określenia częstotliwości własnych systemu przekładni - reflektor: a) przemieszczenia w czasie, b) odpowiadające im widma przeszczeń [3]

Fig. 2. The initial tests of deflections to determine the natural frequencies of the system "transmission gear" - reflector: a) the deflection in time, b) the corresponding deflection spectra [3]

Badania eksperymentalne przeprowadzono w jednym przekroju przepustu (w koronie bezpośrednio pod linią kolejową), gdzie oczekiwano maksymalnych przemieszczeń i częstotliwości drgań. W celu uzyskania częstotliwości drgań przepustu kolejowego, zarejestrowane przemieszczenia poddano analizie metodą FDD. Szczegółowy opis tej metody podano m.in. w pracach [2], [12]. Badania eksperymentalne przeprowadzono w sposób ciągły przez 24 godziny. Podczas tego okresu przez obiekt przejechało czterdzieści jeden różnych pociągów (osiemnaście – pasażerskich, osiemnaście – towarowych, pięć – innych). Na rys. 3 pokazano przepust kolejowy w trakcie badań za pomocą radaru interferencyjnego. Całkowite obciążenie badanego przepustu wynosiło: pociągi pasażerskie – 32006 kN, pociągi towarowe – 144211 kN i inne – 4002 kN. Jednocześnie należy zauważyć, że maksymalna masa pociągu pasażerskiego wyniosła 3236 kN, a pociągu towarowego – 16867 kN. Maksymalna długość pociągu osobowego wynosiła 178 m, a pociągu towarowego ponad 520 m. Największa prędkość przejeżdżających pociągów towarowych wynosiła 12,5 m/s a pociągów pasażerskich 33,3 m/s. Wykaz wszystkich pociągów przejeżdżających przez badany przepust przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 3. Widok z boku na przepust kolejowy podczas badań doświadczalnych z wykorzystaniem radaru interferencyjnego

Fig. 3. Side view of the railway culvert during experimental tests using the interferometric radar

Tablica 1. Wykaz wszystkich pociągów przejeżdżających przez badany przepust kolejowy

Table 1. The list of all trains passing over the tested railway culvert

Rodzaj pociągu	Czas przejazdu [s]	Długość składu [m]	Masa pociągu [kN]	Prędkość [m/s]
ROPJ	5,04	86	1941,7	18,0
TGRE	5,47	420	15023,7	11,1
ROPJ	6,04	128	2706,6	16,6
LTE	6,32	19	1176,7	11,1
TGZE	6,45	419	16867,4	9,7
ROPJ	7,32	64	1353,3	19,4
MMPE	8,04	178	3236,1	31,9
ZXS	8,35	26	470,7	13,8
ROPJ	8,43	64	1353,3	18,0
TGRE	9,11	262	5805,5	12,5
ROPJ	9,36	64	1353,3	18,0
TMZS	9,48	264	3236,1	11,1
TMZS	10,01	406	6609,6	9,7
LTE	10,10	17	706,0	12,5
ROPJ	11,11	128	2706,6	11,1
TMZS	11,28	202	3236,1	12,5
ROPJ	11,42	86	1941,7	16,6
TMZS	12,14	206	1210	9,7
ZXS	12,33	26	470,7	12,5
ROPJ	12,44	64	1353,3	19,4
TMZS	13,13	412	6609,6	11,1
TMZS	13,32	419	16671,3	9,7
TGRE	14,21	501	12032,7	11,1
ROPJ	14,35	64	1353,3	18,0
TMZS	15,08	414	6609,6	9,7
TMZS	15,37	212	3236,1	11,1
ROPJ	16,12	64	1353,3	18,0
ROPJ	16,45	64	1353,3	20,8
TMZS	17,21	236	11846,4	5,5
ROPJ	17,44	64	1353,3	19,4

Rodzaj pociągu	Czas przejazdu [s]	Długość składu [m]	Masa pociągu [kN]	Prędkość [m/s]
TMZS	18,06	60	1961,3	23,0
TMZS	18,37	523	11767,9	11,1
TMZS	19,04	414	6609,6	8,3
ROPJ	19,15	64	1353,3	19,4
ROPJ	19,20	64	1353,3	19,4
TGRE	19,35	27	912,0	18,0
MMPE	19,49	178	3236,1	33,3
ROPJ	21,23	64	1353,3	18,0
LTE	21,32	19	1176,7	11,1
TMZS	22,33	414	13964,6	9,7
ROPJ	22,57	64	1353,3	18,0

Objaśnienia:
ROPJ – pociąg osobowy,
TGZE, TGRE – międzynarodowy pociąg towarowy,
LTE – lokomotywa,
MMPE – międzynarodowy pasażerski pociąg ekspresowy,
ZXS – pociąg utrzymaniowo-naprawczy,
TMZS – pociąg towarowy.
Prędkość pociągów została ustalona z dokładnością $\pm 1,5$ m/s.

5. WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

W celu przedstawienia możliwości korzystania z radaru interferencyjnego do pomiaru tych szczególnych przepustów przeanalizowano szczegółowo dwa przejazdy pociągów (towarowy i osobowy). Wybrano przejazdy pociągów o różnych ciężarach poszczególnych wagonów. Ten wybór pociągów został ustalony w celu weryfikacji możliwości pomiarów radarem dla szybko zmieniających się różnych obciążeń.

Na rys. 4 pokazano przykład przemieszczenia korony przepustu w czasie. Można zauważyć na nim wpływ poszczególnych osi wagonów pociągu towarowego (nr 23). Całkowita masa przejeżdżającego pociągu wynosiła 12032,7 kN, a jego prędkość 11,1 m/s. Podczas przejazdu pociągu zaobserwowano pięć głównych fazy zachowania się przepustu. Pierwsza faza przedstawia wpływ przejeżdżającej lokomotywy. Maksymalne przemieszczenia w tej fazie przekraczają wartość $f = 0,50 \times 10^{-3}$ m. W tym etapie największe częstotliwości wynosiły 1,3 Hz (rys. 5a). Drugi etap dotyczy przejazdu siedmiu lżejszych wagonów. W tej fazie maksymalne przemieszczenia wyniosły prawie $f = 0,20 \times 10^{-3}$ m, przy częstotliwości 0,8 Hz. Trzecia faza była związana z przejazdem dwunastu ciężkich wagonów. Największe przemieszczenia

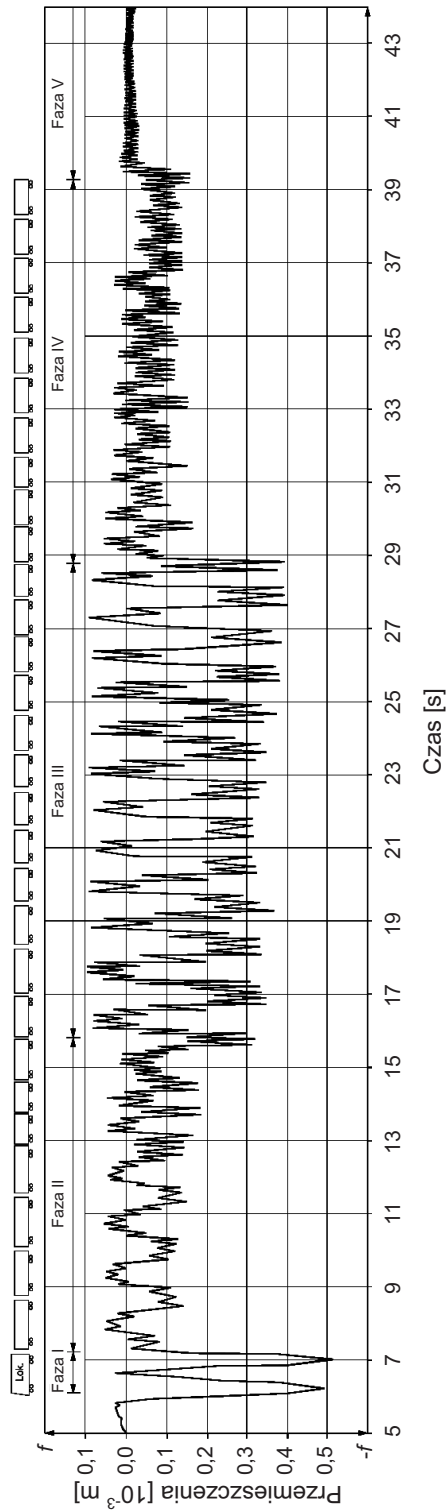
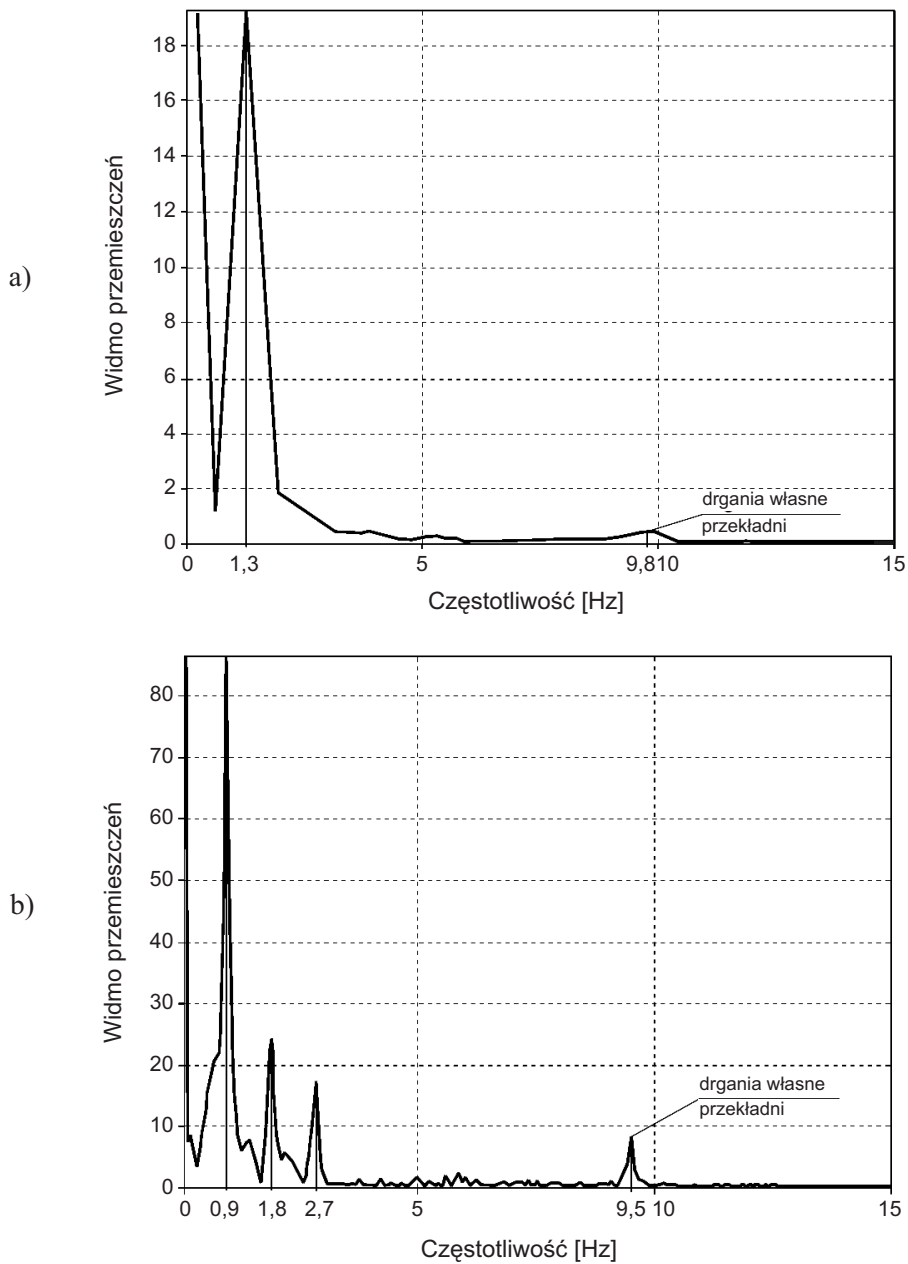


Fig. 4. Przebieg przemieszczeń pionowych w czasie podczas przejazdu pociągu towarowego nr 23
 Fig. 4. The courses of vertical displacements in time during passage of the freight train no. 23



Rys. 5. Widma przemieszczeń korony przepustu wywołane przejazdem pociągu towarowego nr 23 w fazie: a) I i b) III

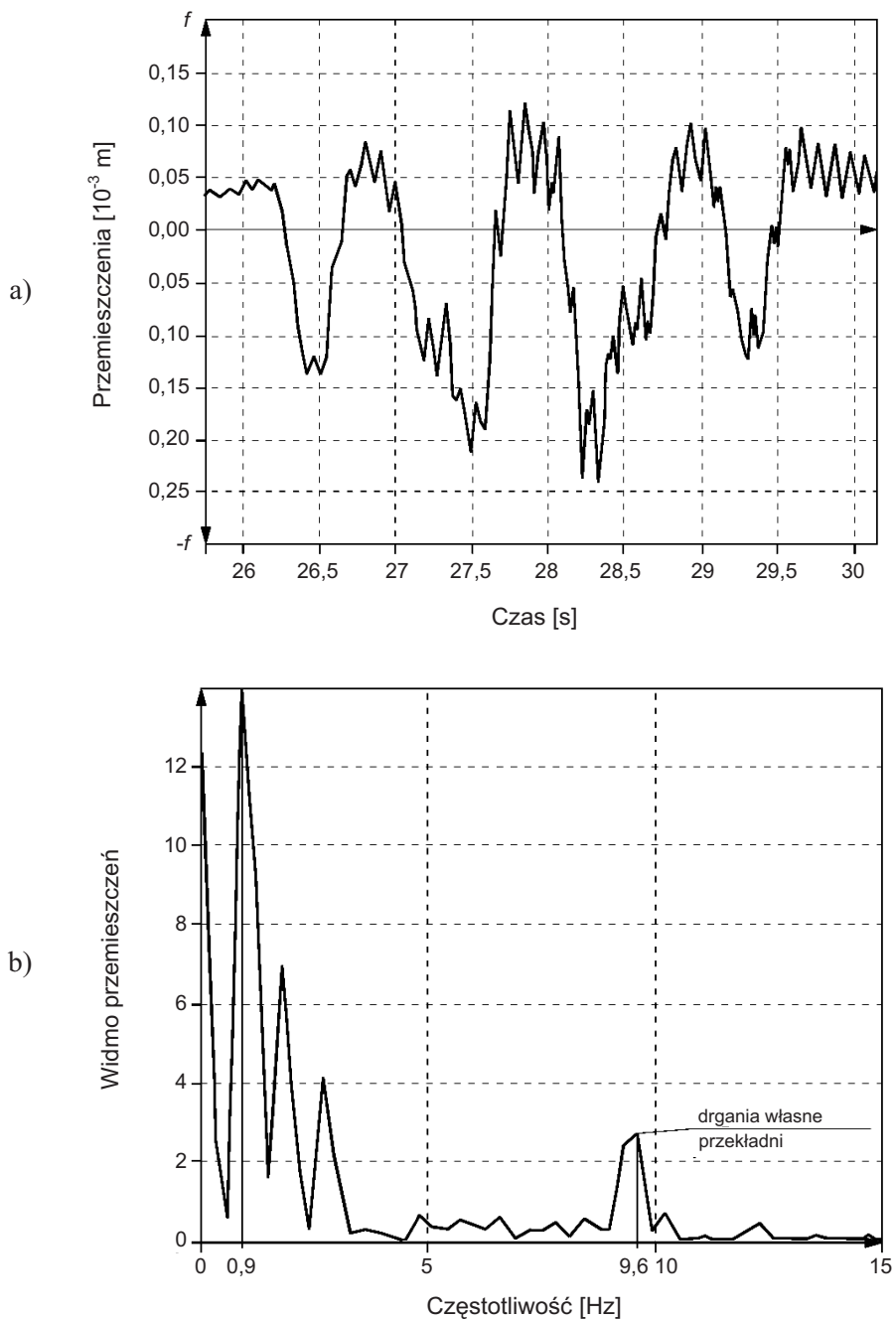
Fig. 5. Spectra of displacements at the crown of culvert in phase: a) I and b) III, for passage of the freight train no. 23

w tej fazie wynosiły prawie $f = 0,40 \times 10^{-3}$ m, a częstotliwości 0,9 Hz (z mniej wyraźnymi 1,8 i 2,7 Hz – rys. 5b). W tym etapie można również zauważyć częstotliwość 9,5 Hz, która jest związana z częstotliwością własną przekładni. Z kolei czwarta faza dotyczy przejazdu dziesięciu lekkich wagonów. Maksymalne przemieszczenia w tej fazie nie przekraczały $0,15 \times 10^{-3}$ m. W tym etapie można wyróżnić częstotliwości 1,2, 1,8 i 2,2 Hz. Natomiast piąta faza dotyczyła zmniejszania się drgań (tłumienia) po przejeździe całego składu pociągu. W tym etapie dominowała częstotliwość 9,6 Hz, która została zidentyfikowana, zgodnie z badaniami wstępnymi, jako częstotliwość własna przekładni.

Drugi przypadek dotyczy przejazdu trójwagonowego pociągu osobowego (nr 34). Całkowita masa tego pociągu wynosiła 1353,3 kN przy prędkości 19,4 m/s. Przebieg przemieszczeń pionowych przepustu kolejowego w czasie przedstawiono na rys. 6a. Maksymalne przemieszczenia wynosiły $f = 0,24 \times 10^{-3}$ m przy częstotliwości 0,9 Hz (rys. 6b) i były one wywołane przejazdem środkowego wagonu. Podczas przejazdu tego pociągu zauważono także dwa symetryczne ugięcia przepustu o mniejszej wartości ($f = 0,14 \times 10^{-3}$ m) spowodowane przez jednostki sterujące (przednią i tylną). Tak jak w poprzednim analizowanym przypadku, w fazie redukcji drgań, wystąpiła częstotliwość 9,6 Hz (rys. 6b), który odnosi się do częstotliwości własnej przekładni.

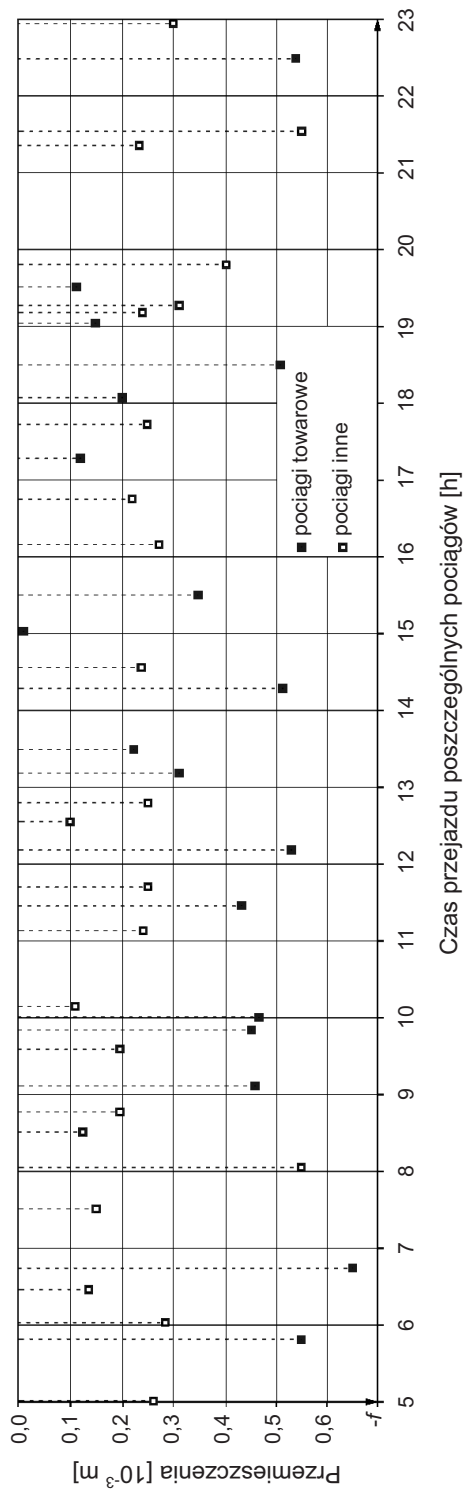
Można zauważyć, że podczas przejazdu stosunkowo lekkiego pociągu osobowego nr 34, ale z dość dużą prędkością uzyskano znacznie mniejsze przemieszczenia niż w przypadku przejazdu o wiele cięższego pociągu towarowego nr 23, ale jadącego ze znacznie mniejszą prędkością. Typowa odpowiedź przepustu kolejowego wykonanego z blach falistych od przejeżdżających pociągów jest zazwyczaj zbiorem trzech częstotliwości w zakresie od 0,6 do 3,0 Hz. Największe wartości częstotliwości zostały spowodowane przez przejazd pociągów ekspresowych (prędkość była w przedziale od 19,4 do 33,3 m/s). Z kolei maksymalne pionowe przemieszczenia korony przepustu nie przekraczały $f = 0,65 \times 10^{-3}$ m. Zostały one uzyskane w trakcie przejazdu ciężkich pociągów towarowych. Natomiast, najmniejsze zarejestrowane przemieszczenia przepustu podczas badań wynosiły $f = 0,08 \times 10^{-3}$ m. Maksymalne przemieszczenia pionowe korony przepustu wykonanego z blach falistych otrzymanych od wszystkich przejeżdżających pociągów pokazano na rys. 7.

Przepust z blach falistych reaguje bardzo szybko na zmiany obciążeń. Redukcja przemieszczeń następuje natychmiast po zjeździe pociągów z obiektu. Radar interferencyjny prawidłowo reaguje na szybkie i częste zmiany obciążenia [3]. Drgań własnych konstrukcji powłoki nie stwierdzono. Prawdopodobnie jest to spowodowane dużą grubością zasypki umieszczoną nad stalową konstrukcją powłoki, która w tym przypadku jest tłumikiem drgań.



Rys. 6. Przebiegi: a) przemieszczeń pionowych w czasie, b) widma przemieszczeń, podczas przejazdu pociągu osobowego nr 34

Fig. 6. The courses of: a) vertical displacements in time, b) spectra of displacements, during passage of the passenger train no. 34



Rys. 7. Maksymalne pomierzone przemieszczenia przepustu kolejowego pod obciążeniem eksploatacyjnym

Fig. 7. Measured maximum displacements of the railway culvert under service loads

6. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych pod obciążeniem eksploatacyjnym na przepuszczeniu kolejowym wykonanym ze stalowych blach falistych, zarejestrowano przemieszczenia pionowe i wyznaczono częstotliwości drgań wykorzystując metodę FDD. Wyniki badań dynamicznych tego przepustu uzyskano przy zastosowaniu radaru interferencyjnego. W szczególności wyniki przedstawione w artykule wyraźnie wskazują, że:

1. Radar interferencyjny jest odpowiednim instrumentem do długookresowych pomiarów (monitoringu) przepustów i mostów o małych i średnich rozpiętościach teoretycznych. Zastosowanie tego urządzenia pozwoliło w bardzo szybki sposób i na wysokim poziomie dokładności uzyskać przemieszczenia i częstotliwości drgań przepustu. Radar interferencyjny zarejestrował nawet bardzo małe wartości przemieszczeń rzędu 0,01 mm i częstotliwości 0,1 Hz.
2. Zastosowanie specjalnie skonstruowanej przekładni nie wpływało zasadniczo na uzyskiwane wyniki pomiarów. Na podstawie badań wstępnych ustalono częstotliwości własne przekładni, co pozwoliło w głównych badaniach w sposób jednoznaczny wyznaczyć częstotliwości drgań przepustu.
3. Zachowanie się przepustu kolejowego pod obciążeniem eksploatacyjnym po trzynastu latach jego użytkowania jest prawidłowe, tzn. nie stwierdzono zwiększonych wartości przemieszczeń i częstotliwości w porównaniu do badań pod obciążeniem statycznym i dynamicznym podobnych przepustów. Największe dynamiczne odpowiedzi tego przepustu były spowodowane głównie przez przejazdy pociągów towarowych i ekspresowych pociągów pasażerskich. Inne rodzaje pociągów, np. pociągi osobowe, utrzymaniowo-naprawcze, lokomotywy nie miały znaczącego dynamicznego wpływu na przepust kolejowy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Atzeni C., Partoli G.*: Interferometric radar vs. accelerometer for dynamic monitoring of large structures: An experimental comparison. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2008, **41**, 4, 258 - 264
- [2] *Gentile C., Bernardini G.*: Output-only model identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2008, **41**, 7, 544 - 553
- [3] *Beben D.*: Application of the interferometric radar for dynamic tests of corrugated steel plate (CSP) culvert. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2011, **44**, 5, 405 - 412
- [4] *Dei D., Pieraccini M., Fratini M., Atzeni C., Bartoli G.*: Detection of vertical bending and torsional movements of a bridge using a coherent radar. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2009, **42**, 8, 741 - 747

- [5] *Gentile C.*: Deflection measurement on vibrating stay cables by non-contact microwave interferometer. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2010, **43**, 3, 231 - 240
- [6] *Fratini M., Parrini F., Pieraccini M., Borri C., Atzeni C.*: Structural oscillation modes identification by applying controlled loads and using microwave interferometry. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2009, **42**, 8, 748 - 752
- [7] *Pieraccini M., Parrini F., Fratini M., Atzeni C., Spinelli P., Micheloni M.*: Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2007, **40**, 3, 208 - 214
- [8] *Pieraccini M., Parrini F., Fratini M., Atzeni C., Spinelli P.*: In-service testing of wind turbine towers using a microwave sensor. *Renewable Energy*, 2008, **33**, 1, 13 - 21
- [9] *Pieraccini M., Parrini F., Dei D., Fratini M., Atzeni C.*: Dynamic characterization of bell-tower by interferometric sensor. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2007, **40**, 5, 390 - 396
- [10] *Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Atzeni C.*: Dynamic monitoring of bridges using a high speed coherent radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**, 11, 3284 - 3288
- [11] *Pieraccini M., Tarchi D., Rudolf H., Leva D., Luzi G., Bartoli G., Atzeni C.*: Structural static testing by interferometric synthetic radar. *Non-destructive Testing & Evaluation International*, 2000, **33**, 8, 565 - 570
- [12] *Brincker R., Andersen P., Zhang L.*: Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. 18th International Conference on Modal Analysis, San Antonio 2000, 625 - 630

EXPERIMENTAL TESTS OF RAILWAY CULVERT MADE FROM CORRUGATED PLATES UNDER SERVICE LOADS USING INTERFEROMETRIC RADAR

Abstract

The paper presents the selected results of experimental tests under service loads that were conducted on a railway culvert made from corrugated steel plates. The displacements of the railway culvert were measured using the microwave interferometric radar. Based on the measured displacements, the frequencies of culvert were determined using the FDD (Frequency Domain Decomposition) method. The dynamic loads were caused by the passages of various trains running on this railway line. Conclusions drawn from the conducted tests can be helpful in the measurements using the microwave interferometry method, with particular emphasis of small to medium culverts and bridges.