



PIOTR OLASZEK¹⁾
ARTUR SAKOWSKI²⁾
EWA TWARDOSZ³⁾
PAWEŁ NUREK⁴⁾

TESTS OF DYNAMIC IMPACT FROM TRAINS ON NOISE BARRIERS

BADANIA ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH POCIĄGÓW NA EKRANY PRZECIWAŁASOWE

STRESZCZENIE. Tematem artykułu są oddziaływania dynamiczne przejeżdżających pociągów na ekrany przeciwhałasowe. Badania oddziaływania pociągów przeprowadzono na dwóch odcinkach: pierwszym, gdzie ekrany znajdowały się w odległości poniżej 3,8 m od osi toru i występowały liczne uszkodzenia ekranów oraz na drugim, gdzie ekrany tego samego typu znajdowały się w odległości 4,6 m od osi toru i nie występowały żadne uszkodzenia ekranów. Opisano metodę wyznaczania przemieszczeń powstałych podczas oddziaływania obciążeń aerodynamicznych poprzez pomiar przyspieszeń drgań i podwójne całkowanie. Uzyskane wyniki badań porównano z otrzymanymi na podstawie pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem radaru interferencyjnego. Zaproponowano parametry, które będą wykorzystywane przy analizie i ocenie wielkości oddziaływań dynamicznych, których źródłem są przejeżdżające pociągi. Zestawiono wyniki analizy oddziaływań pociągów na dwóch odcinkach linii kolejowej. Przedstawiono także badania laboratoryjne nieuszkodzonego panelu ekranu przeciwhałasowego. Sformułowano wnioski związane ze stosowaniem ekranów podatnych na oddziaływania zmęczeniowe pików nadciśnienia i podciśnienia.

SŁOWA KLUCZOWE: aerodynamiczne oddziaływania pociągów, dynamika, ekrany przeciwhałasowe, linie kolejowe dużych prędkości.

ABSTRACT. The article presents an investigation on the dynamic impact from passing trains on noise barriers. The effect was an investigation along two railway line sections: on the first section the barriers were located less than 3.8 m from the track axis and considerable distress of the barriers was observed; on the second section barriers of the same type were located 4.6 m from the track axis and no distress was noted. A method for determination of displacement occurring under aerodynamic loading is presented, based on measurement of vibration acceleration and calculation of double integral. The obtained results are compared with measurements from an interferometric radar. Parameters for analysis and assessment of the magnitude of dynamic impact from passing trains are proposed. The results of the analyses performed on the two railway line sections are compared. The article also presents laboratory tests of an undamaged noise barrier panel. Conclusions are formulated regarding the use of noise barriers susceptible to fatigue due to alternating positive and negative aerodynamic pressure peaks.

KEYWORDS: aerodynamic excitation from trains, dynamics, high-speed rail lines, noise barriers.

DOI: 10.7409/rabdim.020.016

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa, polaszek@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; asakowski@ibdim.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; etwardosz@ibdim.edu.pl

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa, pnurek@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Wzrost prędkości ruchu pociągów na liniach kolejowych powoduje znaczny wzrost oddziaływań taboru kolejowego na konstrukcje mostowe i wymaga rozwiązania wielu złożonych zagadnień technicznych [1]. Zdaniem autorów podobne zjawisko występuje przy oddziaływaniach dynamicznych przejeżdżających pociągów na ekrany przeciwhałasowe. W literaturze wielu krajów można znaleźć prace związane z analizą źródeł hałasu na liniach kolejowych [2, 3] oraz z efektywnością ochrony przeciwhałasowej różnego rodzaju ekranów [4-7]. Problematyka oddziaływań dynamicznych przejeżdżających pociągów na ekrany przeciwhałasowe pojawia się najczęściej w literaturze państw, w których od wielu lat występują linie kolejowe dużych prędkości. W publikacji [8] badacze z Japonii wskazują, że w przypadku projektowania ekranów trzeba brać pod uwagę różne efekty, takie jak oddziaływania aerodynamiczne pociągu, zmęczenie, oddziaływania śniegu związane z przejazdem pociągu, efekt trzęsień ziemi oraz obciążenia wiatrem. Wskazano również na fakt, że w wielu pracach badawczych związanych z ekranami koncentrowano się na izolacji przeciwhałasowej, a pomijano problem oddziaływań aerodynamicznych pociągów. Na podstawie przeprowadzonych badań podkreślono konieczność projektowania ekranów z uwzględnieniem tych oddziaływań. Jednym z elementów powinna być analiza efektu rezonansu pulsującego ciśnienia aerodynamicznego spowodowanego przez jadący pociąg i częstotliwości drgań własnych bariery.

W publikacji [9] autorzy z Chin prezentują wyniki badań potwierdzające występowanie dwóch spowodowanych przez przejazd pociągu znaczących impulsów ciśnienia aerodynamicznego, które są przeciwnego znaku. Wartość ciśnienia aerodynamicznego jest proporcjonalna do drugiej potęgi prędkości przejeżdżającego pociągu. W kolejnej publikacji z Chin [10] zwrócono uwagę na fakt, że w przypadku prowadzenia linii kolejowych dużej prędkości poprzez tereny wysoko zurbanizowane często linie kolejowe są sytuowane na obiektach mostowych wyposażonych w bariery przeciwhałasowe. W takich przypadkach przejazd pociągu odbywa się w pobliżu bariery przeciwhałasowej i wywołuje znaczne, zmienne oddziaływania ciśnienia aerodynamicznego na powierzchnię bariery. W pracy podkreślono także duży wpływ aerodynamicznego kształtu czoła pociągu na wielkość wywołanych oddziaływań dynamicznych na ekrany przeciwhałasowe. Przykład występowania uszkodzeń zmęczeniowych połączeń ekranów akustycznych został przedstawiony w [11].

W publikacji z Austrii [12] podano czynniki, od których zależy amplituda ciśnienia oddziaływań aerodynamicznych na znajdujące się w pobliżu torów kolejowych konstrukcje:

1. INTRODUCTION

The increase in train speed on railway lines leads to a significant increase in the impact of the rolling stock on bridge structures and requires finding solutions to various complex technical issues [1]. In the opinion of the authors, the same applies to the dynamic impact of passing trains on noise barriers. The literature from many countries includes works devoted to analysis of noise sources on railway lines [2, 3] and the effectiveness of noise protection provided by barriers of various types [4-7]. The issues of dynamic impact of passing trains on noise barriers usually appear in the literature from countries where high-speed railway lines have been in operation for many years. In [8] researchers from Japan point out that in noise barrier design it is necessary to take various effects into account, including aerodynamic actions from trains, fatigue, impact of snow due to train passage, earthquakes and wind loading. It is also indicated that many previous research works devoted to noise barriers focused on noise reduction, whereas the issue of train aerodynamic impact was often ignored. Based on the performed research, the need to include such actions in noise barrier design was emphasized, one of the key elements being the analysis of the resonance effect between pulse excitation of the train draft pressure and the natural frequency of the noise barriers.

In paper [9] Chinese authors present the results of research confirming the occurrence of two significant aerodynamic pressure impulses of opposite sign. The magnitude of aerodynamic pressure is proportional to the second power of the speed of the passing train. Another publication from China [10] emphasizes the fact that when high-speed railway lines cross highly urbanized areas the tracks are often located on bridge structures fitted with noise barriers. In such cases the train passes very close to the barrier and causes significant alternating actions of aerodynamic pressure on its surface. Importance of the aerodynamic shape of train nose in terms of its influence on dynamic action on noise barriers was emphasized in the paper as well. A case of fatigue failure of noise barrier connectors was presented in [11].

Publication [12] from Austria specifies factors that affect the amplitude of aerodynamic pressure on structures located in the vicinity of the track:

- the square of the speed of the passing train,
- the aerodynamic shape of the train,
- the shape of the structure,
- the location of the structure, particularly – the clearance between the structure and the train.

- kwadrat prędkości jadącego pociągu,
- aerodynamiczny kształt pociągu,
- kształt konstrukcji,
- położenie konstrukcji, a szczególnie prześwit pomiędzy konstrukcją a pociągiem.

Omówiono również konieczność uwzględniania obciążeń zmęczeniowych przy projektowaniu ekranów przeciwhałasowych w pobliżu linii kolejowych dużych prędkości.

W publikacji z Włoch [13] zwrócono uwagę na konieczność uwzględniania oddziaływań aerodynamicznych przejeżdżających pociągów podczas projektowania wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej ekranów przeciwhałasowych. Podkreślono szczególne znaczenie oddziaływań aerodynamicznych przy prędkościach przejazdu pociągów zbliżonej do 300 km/h.

Na jednej z linii kolejowych w Polsce, gdzie odbywa się obecnie ruch pociągów z prędkością do 160 km/h, zaobserwowano uszkodzenia ekranów przeciwhałasowych typu „zielona ściana”. Ekran taki ma konstrukcję szkieletową, składa się ze słupów w rozstawie co 4 m lub 5 m i wypełnienia pomiędzy nimi. W dalszej części artykułu opisany fragment ekranu – od słupa do słupa – nazwany został, analogicznie do nazewnictwa stosowanego przy opisywaniu elementów ogrodzenia, przęsłem. Wspomniane słupy wykonane są z kształtowników walcowanych na gorąco HEB160 i wzmacniane dodatkowo przy podstawie kształtownikiem 1/2HEB160 do wysokości 1,95 m. Słupy są przymocowane do głowic pali fundamentowych. Wypełnienie ekranów stanowią panele typu „zielona ściana”. Składają się one z nitowanej ramy nośnej wykonanej z profili aluminiowych i siatki z prętów stalowych oraz z wypełnienia akustycznego, złożonego z dwóch warstw wełny mineralnej i zabezpieczone gosiatkami z polietylenu.

Zaobserwowano następujące rodzaje uszkodzeń:

- braki paneli (panele zostały usunięte ze względów bezpieczeństwa lub wypadły) (Rys. 1),
- pęknięcia poprzeczne i wzdłużne w zagięciach profili poziomych i pionowych ramy panelu w pobliżu nitów (Rys. 2),
- wyrwane/ścięte nity mocujące siatki stalowe do profili poziomych (Rys. 3) oraz oderwane i wypadające profile pionowe,
- braki w wypełnieniu paneli (braki siatki z polietylenu i wełny mineralnej) powstałe na skutek ww. uszkodzeń.

The need to consider fatigue loading in design of noise barriers adjacent to high-speed lines was discussed as well.

The paper from Italy [13] emphasizes the need to take the aerodynamic impact of passing trains into account in the design of both ultimate and fatigue strength of noise barriers. Particular importance of aerodynamic effects at train speeds of approximately 300 km/h was underscored.

In Poland, on one of the railway lines where the trains travel at the speed of up to 160 km/h, considerable distress of the so-called “green wall” noise barriers was observed. Such barriers are constructed from filling panels installed between columns, which are spaced every 4 m or 5 m. Such a segment of the barrier – from one column to another – will be further referred to as a “span”. The columns consist of hot-rolled HEB160 beams that are additionally reinforced with 1/2HEB160 beams from their base up to the height of 1.95 m. The columns are mounted on the heads of pile foundations. The barriers are filled with “green wall” panels, which consist of a riveted bearing frame made from aluminum profiles and steel mesh that support acoustic filler – two layers of mineral wool protected with polyethylene net.

The following types of damage were observed:

- missing panels (panels had been removed for safety reasons or had fallen out) (Fig. 1),
- transverse and longitudinal cracks in the corners of horizontal and vertical profiles of the panel frame, in the vicinity of rivets (Fig. 2),
- sheared/torn out rivets fastening the steel meshes to horizontal profiles (Fig. 3) as well as torn or missing vertical profiles,
- defects in the panel filling (defects in polyethylene net and mineral wool) resulting from the aforementioned damage.



Fig. 1. Panels falling out of the barrier
Rys. 1. Panele wypadające z ekranu



Fig. 2. Transverse and longitudinal cracks in the corners of horizontal and vertical profiles of the panel frame, in the vicinity of rivets

Rys. 2. Pęknięcia poprzeczne i wzdłużne w zagięciach profili poziomych i pionowych ramy panelu w pobliżu nitów je mocujących

Uszkodzenia te zaobserwowano w przypadku ekranów przeciwhałasowych usytuowanych wzdłuż linii kolejowych w odległości mniejszej niż 4,00 m (od 3,66 m do 3,92 m) od osi toru. W związku z tym przeprowadzono analizę przyczyn występowania takich uszkodzeń poprzez badania oddziaływań dynamicznych spowodowanych przez przejeżdżające pociągi. Celem prowadzonych analiz było również potwierdzenie prezentowanych w literaturze i normach zależności wielkości oddziaływań dynamicznych od prędkości i kształtu czoła przejeżdżającego pociągu oraz odległości ekranu od osi toru. Zakres prac obejmował badania terenowe dwóch fragmentów ekranów oraz badania laboratoryjne elementów tych ekranów. Badania terenowe przeprowadzono na dwóch odcinkach: pierwszym, gdzie ekrany znajdowały się w odległości poniżej 3,8 m od osi toru i występowały liczne uszkodzenia ekranów oraz na drugim odcinku, gdzie ekrany tego samego typu znajdowały się w odległości 4,6 m od osi toru i nie występowały żadne uszkodzenia ekranów. Przeprowadzono również badania laboratoryjne nieuszkodzonych paneli ekranu przeciwhałasowego.

2. NORMOWY SPOSÓB OBLICZANIA ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH POCIĄGÓW NA EKRANY PRZECIWHĄŁASOWE

Obliczenia oddziaływań dynamicznych pociągów na konstrukcje znajdujące się w pobliżu torów są przedmiotem licznych publikacji, jedna z podstawowych to [14]. W publikacji



Fig. 3. Sheared/torn out rivets fastening the steel mesh to horizontal profiles

Rys. 3. Wyrwane/ścięte nity mocujące siatki stalowe do profili poziomych

The above types of damage were observed in barriers located along railway lines at the distance of less than 4.0 m (3.66 m to 3.92 m) from the axis of the track. Therefore, their causes were analyzed through research of dynamic impact of passing trains. The aim of the performed analyses was to confirm the dynamic impact relationships given in the literature and standards for speed, train nose shape and the distance of the barrier from the track axis. The scope of the research encompassed field testing of two noise barrier sections as well as laboratory testing of identical barriers. Field research was performed on two sections: on the first section the barriers were located less than 3.8 m from the track axis and considerable distress of the barriers was observed; on the second section barriers of the same type were located 4.6 m from the track axis and no distress was noted. Laboratory tests were performed on undamaged noise barrier panels.

2. CALCULATION OF DYNAMIC IMPACT OF TRAINS ON NOISE BARRIERS ACCORDING TO THE STANDARDS

Calculations of dynamic impact of trains on structures located in the vicinity of railway tracks are the subject of many publications, one of the basic works being [14]. This publication presents the results of research devoted to dynamic impact of trains on noise barriers, as well as conclusions drawn from the use of applicable standards in Great Britain. One of the conclusions emphasizes the need to compile fatigue load spectra, whose use is recommended in calculations concerning structures that may be affected by fatigue.

tej zaprezentowano wyniki badań oddziaływań dynamicznych pociągów na ekrany przeciwhałasowe, jak również wnioski związane ze stosowaniem norm w tym zakresie w Wielkiej Brytanii. W jednym z wniosków podkreślono konieczność opracowania widmobiężeń zmęczeniowych zalecanych do stosowania w obliczeniach w przypadku konstrukcji podanych na zmęczenie.

Sposób obliczania wielkości oddziaływań aerodynamicznych wywołanych przez przejeżdżające pociągi na ekrany przeciwhałasowe został opisany w normie PN-EN 1991-2 w rozdziale Oddziaływania aerodynamiczne wywołane przejeżdżającymi pociągami [15]. Oddziaływanie aerodynamiczne jest zależne od rodzaju i kształtu powierzchni ekranu (pionowej lub poziomej), wielkości elementów składowych ekranu, odległości lica ekranu od osi toru, jak również od kształtu aerodynamicznego i prędkości przejeżdżających pociągów. Wartości charakterystyczne oddziaływań według tej normy są określone poprzez wartości ciśnienia aerodynamicznego w funkcji odległości lica ekranu od osi toru przy różnych maksymalnych prędkościach pociągów. Funkcje te zapisane są w postaci nomogramów. W normie uwzględnia się również współczynniki, takie jak:

- współczynnik obciążeń krawędziowych – współczynnik dynamiczny równy 2, stosowany na długości 5 m od początku i końca odcinka ekranów,
- współczynnik uwzględniający wielkość elementów, z których składa się ekran – współczynnik równy 1,3 stosowany do elementów o wysokości $\leq 1,0$ m i długości $\leq 2,5$ m,
- współczynnik kształtu aerodynamicznego pociągów, wynoszący:
 - 0,60 w przypadku taboru opływowego (np.: ETR, ICE, TGV, Eurostar itp.),
 - 0,85 w przypadku pociągów z nieaerodynamicznym czołem, lecz gładką boczną powierzchnią.

Na podstawie ww. normy wyznaczono wartość oddziaływania ciśnienia aerodynamicznego na badane ekrany. Wartość ciśnienia jest równa $0,24 \text{ kN/m}^2$ przy minimalnej odległości lica ekranu od osi torów równej 3,66 m i maksymalnej prędkości pociągów 160 km/h. Po uwzględnieniu współczynnika obciążeń krawędziowych na początku i końcu odcinka ekranu wartość ciśnienia wzrasta do $0,48 \text{ kN/m}^2$. Nie uwzględniano współczynników kształtu aerodynamicznego pociągów, ponieważ po torach przemieszczały się różne ich rodzaje.

In Poland the method for calculation of magnitude of aerodynamic impact of trains on noise barriers was described in the PN-EN 1991-2 standard, in the section titled Aerodynamic actions from passing trains [15]. The aerodynamic impact depends on the type and shape of the barrier surface (vertical or horizontal), the size of the elements of the barrier, distance between the barrier face and the track axis, as well as aerodynamic shape and speed of the passing trains. According to the standard, the characteristic values of dynamic actions are represented by the values of aerodynamic pressure defined as a function of the distance between the barrier face and the track axis for various maximum train speeds. These functions are presented in the form of nomograms. The standard also provides various factors, including:

- factor of edge loading – dynamic amplification factor which equals 2 and is used on 5-meter edge segments on both ends of a given barrier structure,
- factor of barrier element size – equals 1.3 and is introduced if a small part of the barrier (height ≤ 1.0 m and length ≤ 2.5 m) is considered,
- factor of aerodynamic shape of trains, which equals:
 - 0.60 for fully streamlined shape of the rolling stock (e.g. ETR, ICE, TGV, Eurostar or similar),
 - 0.85 for trains with smooth-sided rolling stock.

Based on the aforementioned standard, values of aerodynamic pressure on the tested noise barriers was calculated. The pressure equals 0.24 kN/m^2 at the minimum distance of 3.66 m from the barrier face to the track axis and the maximum train speed of 160 km/h. After the factor of edge loading is taken into account, the pressure that the first and the last 5-m-long segments of the barrier are subjected to is determined as 0.48 kN/m^2 . Factor of aerodynamic shape was not introduced, since various types of trains travelled the analyzed line.

3. FIELD RESEARCH OF TRAIN DYNAMIC IMPACT ON NOISE BARRIERS

3.1. TEST METHOD

The dynamic effect of the passing trains on noise barriers adjacent to the railway line was investigated through measurements of horizontal lateral accelerations of the upper parts of columns and panels using accelerometers. Displacements were subsequently determined using the method of double integrals. In order to validate this indirect method of displacement calculation, comparative

3. BADANIA TERENOWE ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH POCIĄGÓW NA EKRANY PRZECIWHĄŁASOWE

3.1. METODA BADAŃ

Zbadano efekty oddziaływań dynamicznych przejeżdżających pociągów na wybudowane przy torach ekrany przeciwhałasowe poprzez pomiar poziomych poprzecznych przyspieszeń drgań górnej części słupów nośnych i paneli, dokonany z zastosowaniem akcelerometrów. Następnie wyznaczono przemieszczenia metodą podwójnego całkowania. W celu walidacji zastosowanej pośredniej metody wyznaczania przemieszczeń wykonano pomiary porównawcze z użyciem radaru interferencyjnego. Dodatkowo zmierzono prędkości przejazdu pociągów.

Badania wykonano na dwóch odcinkach. Na pierwszym odcinku ekrany znajdowały się w odległości poniżej 3,8 m od osi toru. Występowały tam liczne uszkodzenia ekranów przeciwhałasowych. Czujniki zainstalowano na dwóch przęsłach zawierających najmniej uszkodzonych paneli bądź sąsiadujących z panelami uszkodzonymi (numeracja słupów zgodna z kierunkiem jazdy pociągów):

- przęsło nr 1-2, znajdujące się w odległości 3,71 m od osi toru: słup nr 1, panel 1-2 i słup nr 2 (Rys. 4),
- przęsło nr 6-7, znajdujące się w odległości 3,66 m od osi toru: słup nr 6, panel 6-7, słup nr 7 (Rys. 5).



Fig. 5. The first investigated section: from the left (direction of incoming trains) a span with removed panels, the tested span no. 6-7 with accelerometers (installed on the top of the columns and the panel), visible interferometric radar for displacement measurements

Rys. 5. Pierwszy badany odcinek: od lewej (kierunku najazdu pociągów) przęsło z wyjętymi panelami oraz badane przęsło nr 6-7 z akcelerometrami (zainstalowanymi na górze słupów i panelu), widoczny radar interferencyjny do pomiaru przemieszczeń

measurements were performed using an interferometric radar. Speed of the passing trains was recorded as well.

The tests were performed on two sections. On the first section the noise barriers were located at the distance of less than 3.8 m from the track axis. Considerable damage of noise barriers was observed on the section. The sensors were mounted on two spans which included the least damaged panels and were adjacent to the least damaged ones (the columns were enumerated along the direction of incoming train traffic):

- span no. 1-2, located at the distance of 3.71 m from the track axis: column no. 1, panel 1-2 and column no. 2 (Fig. 4),
- span no. 6-7, located at the distance of 3.66 m from the track axis: column no. 6, panel 6-7, column no. 7 (Fig. 5).



Fig. 4. The first investigated section: from the left (direction of incoming trains) a span with removed panels, the tested span no. 1-2 with visible damaged middle panel and accelerometers (installed on the top of the columns and the panel), and an adjacent span with two damaged panels

Rys. 4. Pierwszy badany odcinek: od lewej (kierunku najazdu pociągów) przęsło z wyjętymi panelami, następnie badane przęsło nr 1-2 z widocznym uszkodzonym środkowym panelem i akcelerometrami (zainstalowanymi na górze słupów i panelu) oraz kolejne przęsło z uszkodzonymi dwoma panelami

On the second tested section the noise barriers were located at the distance of approximately 4.6 m from the track axis. This section comprised solely of undamaged noise panels of the same type. Measurements of vibration acceleration were performed on the first two spans of the section (the columns were enumerated along the direction of incoming trains):

Na drugim badanym odcinku ekrany znajdowały się w odległości od osi toru równej około 4,6 m. Odcinek ten zawierał wyłącznie nieuszkodzone panele przeciwhałasowe tego samego typu. Pomiary przyspieszeń drgań prowadzono na dwóch pierwszych przęsłach odcinka ekranów przeciwhałasowych (numeracja słupów zgodna z kierunkiem jazdy pociągów):

- przęsło 01-02, znajdujące się w odległości 4,60 m od osi toru: słup nr 01, panel 01-02 i słup nr 02;
- przęsło 02-03, znajdujące się w odległości 4,58 m od osi toru: słup nr 02, panel 02-03 i słup nr 03 (Rys. 6).



Fig. 6. The second investigated section: from the left (direction of incoming trains) the tested span no. 01-02 (with accelerometers and interferometric radar reflectors installed on the top of the columns and the panel) and the tested span no. 02-03 (with installed accelerometers)
Rys. 6. Drugi badany odcinek: od lewej (kierunku najazdu pociągów) badane przęsło nr 01-02 (z zainstalowanymi na górze słupów i panelu reflektorami do radaru interferencyjnego i akcelerometrami) oraz badane przęsło 02-03 (z zainstalowanymi akcelerometrami)

Pomiary poziomych poprzecznych przyspieszeń drgań prowadzono z zastosowaniem akcelerometrów indukcyjnych z rejestracją komputerową. Sygnały przyspieszeń były rejestrowane z częstotliwością próbkowania 600 Hz i filtracją dolnoprzepustową 100 Hz. Oszacowana niepewność rozszerzona pomiaru przyspieszeń drgań ze współczynnikiem rozszerzenia $k = 2$ nie przekraczała $0,05 \text{ m/s}^2$. Na Rys. 7 przedstawiono przebieg przyspieszeń drgań górnej części słupa podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego z lokomotywą EP09 o kształcie nieaerodynamicznym. Na Rys. 8 pokazano natomiast przebieg przyspieszeń drgań w tym samym punkcie słupa podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego zespolonego ED250 o kształcie aerodynamicznym (Pendolino typu ETR460).

- span no. 01-02, located at the distance of 4.60 m from the track axis: column no. 01, panel 01-02 and column no. 02,
- span no. 02-03, located at the distance of 4.58 m from the track axis: column no. 02, panel 02-03 and column no. 03 (Fig. 6).

The measurements of horizontal lateral vibration accelerations were performed using induction accelerometers with computer data recording. The acceleration signals were registered at a sampling frequency of 600 Hz and low-pass filtering at 100 Hz. The expanded uncertainty of vibration acceleration measurements estimated using the coverage factor of $k = 2$ did not exceed 0.05 m/s^2 . Fig. 7 presents the plot of vibration acceleration of the upper part of a column induced during the passage of a passenger train with an EP09 nonaerodynamically shaped locomotive at the speed of 160 km/h. Fig. 8., for comparison, shows a plot of vibration acceleration of the same part of the column during the passage of a streamlined passenger multiple-unit train ED250 (Pendolino ETR460 type).

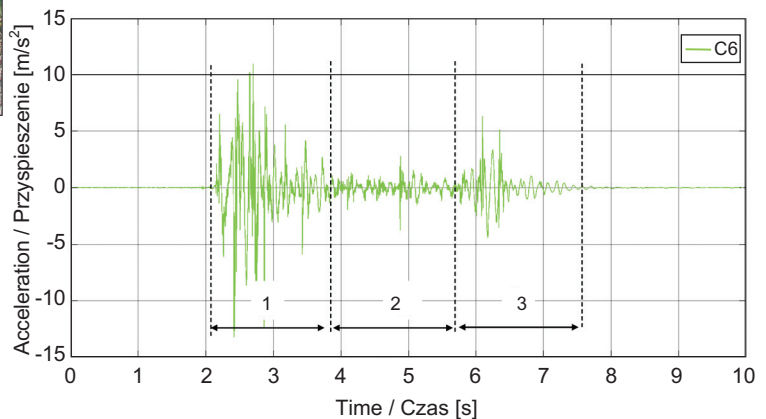


Fig. 7. The first section: plot of vibration acceleration of column no. 6; three intervals are marked, representing the vibration excited by the front, the middle part and the rear of a passenger train with EP09 locomotive at the speed of 160 km/h
Rys. 7. Pierwszy badany odcinek: przebieg przyspieszeń drgań słupa nr 6; zaznaczono trzy przedziały z drganiami spowodowanymi przez najazd początku, przejazd środka i przejazd końca pociągu osobowego z lokomotywą EP09 z prędkością 160 km/h

The plots of vibration accelerations (Figs 7 and 8) are divided into three intervals, representing vibrations excited by the passage of the front of the train, the following cars (middle part of the train) and the last car (the end of the train), respectively.

Na wykresach przebiegów przyspieszeń drgań (Rys. 7 i 8) zaznaczono odpowiednio przedziały drgań spowodowane najazdem czoła pociągu, przejazdem kolejnych wagonów (środką pociągu) oraz przejazdem ostatniego wagonu (tyłu pociągu).

Następnie, podobnie jak w pracy [8], wyznaczono przemieszczenia $d(t)$ metodą pośrednią – podwójnego całkowania. W celu minimalizacji błędów związanych z nieznanymi stałymi całkowania, całkowanie prowadzono oddzielnie w trzech przedziałach odpowiadających fragmentom drgań spowodowanych najazdem czoła pociągu, przejazdem środka pociągu i przejazdem tyłu pociągu:

$$v_{uc}(t) = \int_{t_1}^{t_2} a(t)dt + \int_{t_2}^{t_3} a(t)dt + \int_{t_3}^{t_4} a(t)dt, \quad (1)$$

gdzie:

$v_{uc}(t)$ – prędkość niekorygowana,

$a(t)$ – mierzone przyspieszenie drgań,

t_1 – czas początku drgań spowodowanych przez wjazd czoła pociągu,

t_2 – czas końca drgań spowodowanych przez wjazd czoła pociągu (drgania zmniejszają się i następnie są skutkiem przejazdu środka pociągu),

t_3 – czas początku (wzrostu) drgań spowodowanych przez przejazd tyłu pociągu,

t_4 – czas końca drgań.

W każdym z przedziałów prowadzono oddzielne korekty całkowania, korygujące najpierw wyznaczone przebiegi prędkości $v(t)$, a następnie uzyskane przebiegi przemieszczeń $d(t)$. Korekta polegała na usunięciu w zastosowanym działaniu matematycznym trendu liniowego:

$$v_{uc}(t) \xrightarrow{\text{usunięcie trendu liniowego w przedziałach } t_1-t_2, t_2-t_3, t_3-t_4} v(t), \quad (2)$$

$$d_{uc}(t) = \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt + \int_{t_2}^{t_3} v(t)dt + \int_{t_3}^{t_4} v(t)dt, \quad (3)$$

$$d_{uc}(t) \xrightarrow{\text{usunięcie trendu liniowego w przedziałach } t_1-t_2, t_2-t_3, t_3-t_4} d(t), \quad (4)$$

gdzie:

$d_{uc}(t)$ – przemieszczenie niekorygowane.

Ze względu na zastosowany pośredni sposób wyznaczania przemieszczeń, ekstremalne wartości przemieszczeń w większości przypadków mogą być zaniżone w stosunku do wartości przemieszczeń bezwzględnych.

Dodatkowo prowadzono pomiary porównawcze przemieszczeń wybranych słupów za pomocą radaru interferencyjnego. Radar interferencyjny charakteryzuje się dużą dokładnością

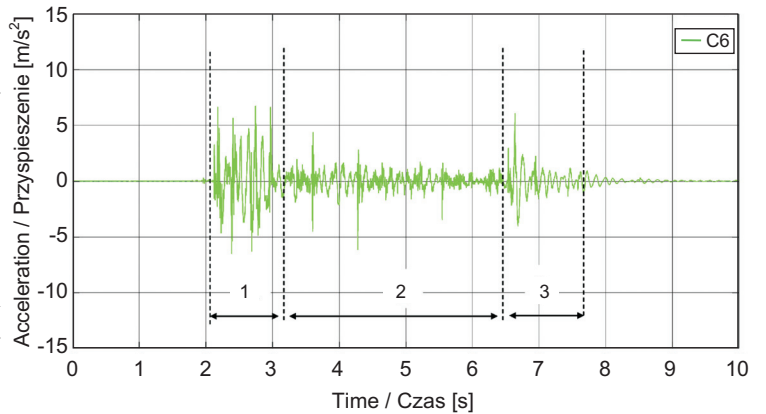


Fig. 8. The first section: plot of vibration acceleration of column no. 6; three intervals are marked, representing the vibration excited by the front, the middle part and the rear of a multiple-unit train ED250 at the speed of 160 km/h

Rys. 8. Pierwszy badany odcinek: przebieg przyspieszeń drgań słupa nr 6; zaznaczono trzy przedziały z drganiami spowodowanymi przez najazd początku, przejazd środka i przejazd końca pociągu zespolonego ED250 z prędkością 160 km/h

Similarly as in the work [8], the displacements $d(t)$ were subsequently calculated using an indirect method – double integration. In order to minimize the error resulting from displacement calculation with unknown constants of integration, the displacements were calculated separately for each of the three intervals reflecting the vibrations induced by passage of the front, middle part and the end of the train:

$$v_{uc}(t) = \int_{t_1}^{t_2} a(t)dt + \int_{t_2}^{t_3} a(t)dt + \int_{t_3}^{t_4} a(t)dt, \quad (1)$$

where:

$v_{uc}(t)$ – uncorrected velocity,

$a(t)$ – measured vibration acceleration,

t_1 – time of the onset of vibrations excited by the passage of the front of the train,

t_2 – time of the end of vibrations resulting from the passage of the front of the train (vibrations decrease and are subsequently related to the passage of the middle part of the train),

t_3 – time of the onset (increase) of vibrations resulting from the passage of the rear part of the train,

t_4 – time of termination of vibrations.

Integration corrections were performed in each of the intervals separately, involving correction of the obtained velocities $v(t)$ and subsequent correction of the obtained displacements $d(t)$. The correction consisted in removal of linear trend:

pomiarów przemieszczeń w kierunku zgodnym z osią celową radaru. Dokładność zmniejsza się wraz ze wzrostem nachylenia osi celowej do kierunku przemieszczeń [16]. Oszacowana niepewność rozszerzona pomiaru poziomych poprzecznych przemieszczeń górnej części słupa ze współczynnikiem rozszerzenia $k = 2$ nie przekraczała 0,05 mm.

Na Rys. 9 i 10 przedstawiono przebiegi przemieszczeń wyznaczone na podstawie przebiegów przyspieszeń z Rys. 7 i 8 wraz z wynikami pomiarów odniesienia uzyskanymi z zastosowaniem radaru interferencyjnego.

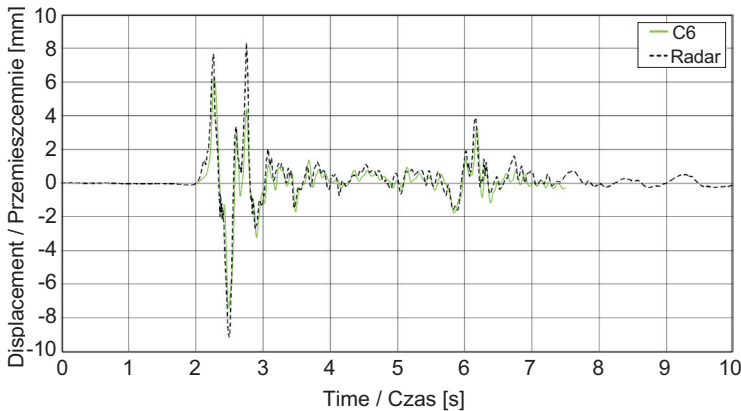


Fig. 9. The first section: a comparison of displacements (C6) determined indirectly (based on vibration accelerations of column no. 6 – Fig. 7) and displacements (Radar) measured using an interferometric radar during the passage of a passenger train with EP09 locomotive at the speed of 160 km/h

Rys. 9. Pierwszy badany odcinek: porównanie wyznaczonego metodą pośrednią (na podstawie przebiegu przyspieszeń drgań słupa nr 6 – Rys. 7) przebiegu przemieszczeń (C6) z przebiegiem zmierzonym z zastosowaniem radaru interferencyjnego (Radar) podczas przejazdu pociągu osobowego z lokomotywą EP09 z prędkością 160 km/h

Na podstawie wyników pomiarów odniesienia wykonanych z zastosowaniem radaru interferencyjnego obliczono procentowe stosunki wartości ekstremalnych amplitud przemieszczeń wyznaczonych pośrednio do wartości zmierzonych bezpośrednio z zastosowaniem radaru interferencyjnego:

- 81-95% w przypadku pierwszego dodatniego piku spowodowanego przez przejazd czoła pociągu,
- 63-85% w przypadku pierwszego ujemnego piku spowodowanego przez przejazd czoła pociągu,
- 74-84% w przypadku ostatniego ujemnego piku spowodowanego przez przejazd tyłu pociągu,
- 85-116% w przypadku ostatniego dodatniego piku spowodowanego przez przejazd tyłu pociągu.

Zaniżenie wartości przemieszczenia wyznaczonego metodą pomiarów pośrednich przy pierwszych pikach jest istotne przy

$$v_{uc}(t) \xrightarrow{\text{removal of linear trend in the intervals } t_1-t_2, t_2-t_3, t_3-t_4} v(t), \quad (2)$$

$$d_{uc}(t) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} v(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} v(t) dt, \quad (3)$$

$$d_{uc}(t) \xrightarrow{\text{removal of linear trend in the intervals } t_1-t_2, t_2-t_3, t_3-t_4} d(t), \quad (4)$$

where:

$d_{uc}(t)$ – uncorrected displacement.

Due to the fact that an indirect method of displacement determination was used, in most cases the extreme values of displacement may be underestimated compared to absolute displacements.

Comparative measurements were performed for selected columns using an interferometric radar, which is characterized by high accuracy of measurements of displacement along the sight axis. The accuracy decreases with an increase in the angle between the sight axis and the direction of the measured displacement [16]. The estimated expanded uncertainty of horizontal lateral displacement measurements with the coverage factor of $k = 2$ did not exceed 0.05 mm.

Figs 9 and 10 present the plots of displacements calculated on the basis of accelerations shown in Figs 7 and 8, together with the reference interferometric radar measurements.

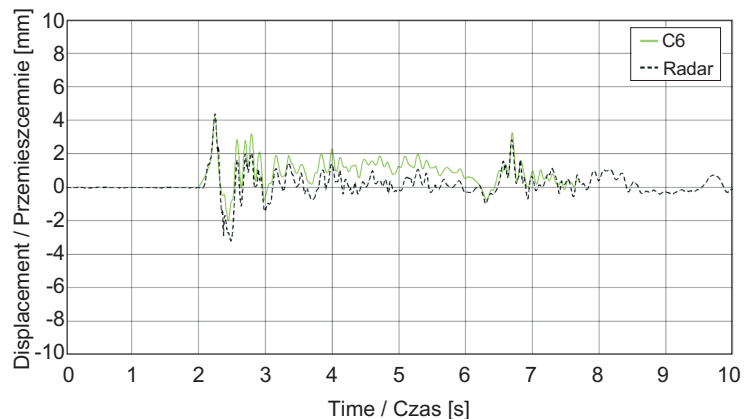


Fig. 10. The first section: a comparison of displacements (C6) determined indirectly (based on vibration accelerations of column no. 6 – Fig. 8) and displacements (Radar) measured using an interferometric radar during the passage of a multiple-unit train ED250 at the speed of 160 km/h

Rys. 10. Pierwszy badany odcinek: porównanie wyznaczonego metodą pośrednią (na podstawie przebiegu przyspieszeń drgań słupa nr 6 – Rys. 8), przebiegu przemieszczeń (C6) z przebiegiem zmierzonym z zastosowaniem radaru interferencyjnego (Radar) podczas przejazdu pociągu zespołowego ED250 z prędkością 160 km/h

analizie wytrzymałości doraźnej ekranów przeciwhałasowych. W przypadku prowadzenia analizy wytrzymałości na zmęczenie i porównywaniu wielkości oddziaływań dynamicznych w zależności od prędkości przejazdu pociągu, aerodynamicznego kształtu pociągu i odległości ekranu od osi toru – zaniżenie to ma zdecydowanie mniejsze znaczenie.

Wyznaczone przebiegi przemieszczeń (drgań) górnej części słupa mają charakter zbliżony do zaprezentowanych w pracy [10] przebiegów ciśnienia aerodynamicznego mierzonego na powierzchni ekranów przeciwhałasowych podczas przejazdów z prędkością 380 km/h pociągów CRH380A EMU w Chinach, do przebiegów sił działających na ekrany podczas przejazdów z prędkością 350 km/h pociągów HSL we Włoszech [13] oraz do przebiegów ciśnienia aerodynamicznego podczas przejazdów z prędkością dochodzącą do 250 km/h pociągów Railjet w Austrii [12]. Przedstawione w wyżej wymienionych publikacjach przebiegi ciśnienia aerodynamicznego lub sił charakteryzują się występowaniem gwałtownego wzrostu ciśnienia, gdy czoło pociągu osiąga badany punkt, następnie ciśnienie spada gwałtownie do ujemnej wartości. Kiedy czoło pociągu minie badany punkt, wartości zmian ciśnienia znacznie spadają, szczególnie w przypadku pociągu zespolonego o jednolitym przekroju. Skoki ciśnienia mogą wynikać ze złożonej struktury wózków i ewentualnych przerw pomiędzy wagonami. Kiedy tył pociągu mija mierzony punkt, ciśnienie najpierw spada, a potem wzrasta, co skutkuje ujemnym, a następnie dodatnim pikiem.

Wykorzystując podobieństwo wyznaczonych przebiegów przemieszczeń do przebiegów ciśnienia aerodynamicznego podanych w literaturze, zaproponowano dwie miary służące do analizy i oceny oddziaływań dynamicznych przejeżdżających pociągów na ekrany przeciwhałasowe. Jako pierwszą miarę przyjęto parametr ΔD (Rys. 11), równy różnicy pomiędzy ekstremalnymi pikami (dodatnim i ujemnym) w przebiegu przemieszczeń, tak jak w pracy [10].

Jako drugą miarę przyjęto przedział czasu ΔT (Rys. 11), identyfikujący krytyczne wzbudzenia drgań, gdy może zachodzić korelacja wymuszenia z połową okresu drgań własnych ekranów [12]. Może wtedy wystąpić znaczne wzmocnienie efektów dynamicznych od przejeżdżających pociągów.

3.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH

Podczas pomiarów prowadzonych na odcinku z ekranami w odległości poniżej 3,8 m od osi toru i licznymi uszkodzeniami ekranów przeciwhałasowych, największe efekty oddziaływań dynamicznych zarejestrowano podczas przejazdu pociągu osobowego z lokomotywą EP09 o kształcie nieaerodynamicznym. Przebieg przyspieszeń słupa zaprezentowano

Based on the reference measurements performed using an interferometric radar, the ratio of indirectly obtained extreme displacement amplitudes to the corresponding amplitudes measured directly was determined (in percent):

- 81-95% in the case of the first positive peak resulting from the passage of the front of the train,
- 63-85% in the case of the first negative peak resulting from the passage of the front of the train,
- 74-84% in the case of the last negative peak resulting from the passage of the end of the train,
- 85-116% in the case of the last positive peak resulting from the passage of the end of the train.

Underestimation of the first peaks of displacement in indirect measurements is significant in analysis of the ultimate strength of the noise barriers. However, such underestimation is much less significant in fatigue analyses and comparisons of the magnitude of dynamic impact depending on train speed, aerodynamic shape of the train or the distance between the barrier and the track axis.

The determined plots of displacements (vibrations) of the upper part of the column are similar to plots of aerodynamic pressure measured on the surfaces of noise barriers during the passage of CRH380A EMU trains at the speed of 380 km/h in China, presented in [10], to plots of forces acting on noise barriers during the passage of HSL trains at 350 km/h in Italy [13] as well as to plots of aerodynamic pressure during the passage of Railjet trains at 250 km/h in Austria [12]. The plots of aerodynamic pressure or forces presented in the aforementioned works are characterized by a rapid increase when the front of the train reaches the investigated location, along with a subsequent rapid decrease to a negative value. After the front of the train passes the investigated point, the absolute values of changes in pressure decrease significantly, especially in the case of multiple-unit trains which have uniform cross-sections along their length. Further fluctuations in pressure may result from complex arrangement of the bogies or from possible gaps between cars. When the rear end of the train passes the measurement location, the pressure decreases and then increases, resulting in a negative peak followed by a positive peak.

Based on the similarities between the plots of the determined displacements and the aerodynamic pressure given in the literature, two measures for analysis and assessment of dynamic impact of the trains are proposed. The first measure is the parameter ΔD (Fig. 11), which equals the difference between the extreme positive and negative peaks of displacement, as described in the work [10].

na Rys. 7. Na Rys. 9 przedstawiono porównanie przebiegów przemieszczeń wyznaczonych metodą pośrednią (podwójnego całkowania) z pomiarami dokonanyymi za pomocą radaru interferencyjnego. Na Rys. 12 porównano przebiegi przemieszczeń słupów i panelu. Na Rys. 8, 10 oraz 13 zilustrowano analogiczne parametry podczas przejazdu pociągu zespołowego ED250 o kształcie aerodynamicznym z prędkością 160 km/h.

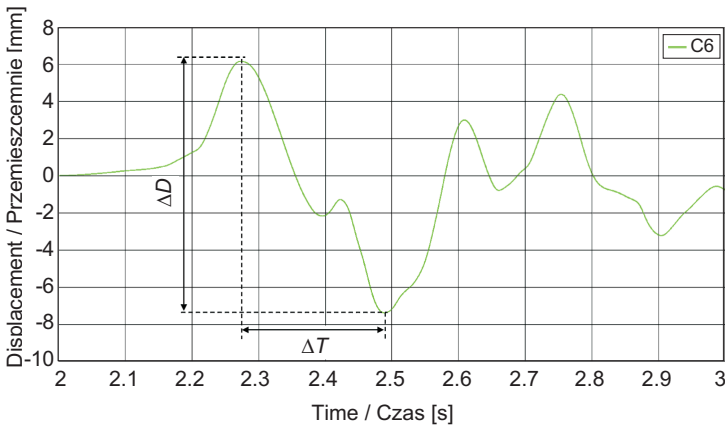


Fig. 11. Parameters for assessment of dynamic impact of trains on noise barriers: ΔD – peak-to-peak amplitude between the maximum and minimum value, and ΔT – time between the maximum and minimum peak (presented in a selected range of the displacement plot from Fig. 7)

Rys. 11. Parametry oceny oddziaływań dynamicznych pociągów na ekrany: ΔD – podwójna amplituda pomiędzy amplitudą maksymalną i minimalną oraz ΔT – czas przejścia pomiędzy amplitudą maksymalną i minimalną (prezentacja w wybranym przedziale przebiegu przemieszczeń z Rys. 7)

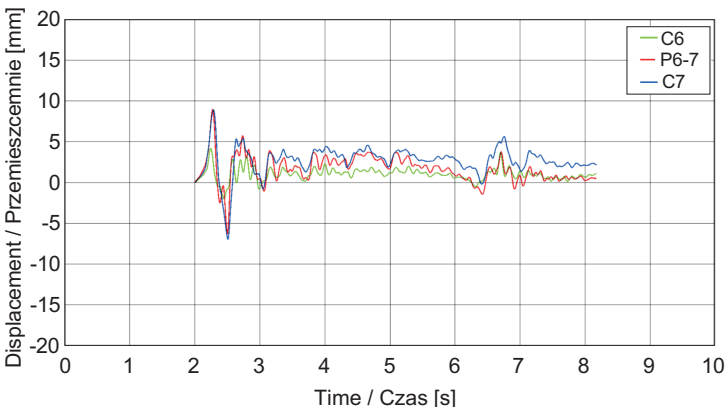


Fig. 13. The first section: displacements of column no. 6, panel no. 6-7 and column no. 7 during the passage of a multiple-unit train ED250 at the speed of 160 km/h

Rys. 13. Pierwszy badany odcinek: przebieg przemieszczeń słupa nr 6, panelu 6-7 i słupa 7 podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego zespołowego ED250

The second assumed measure is the time interval ΔT (Fig. 11), identifying the critical excitation of vibrations, at which a correlation may occur between the excitation and the natural half-period of vibration of the barriers [12]. A significant amplification of dynamic effects from the passing train may potentially occur in such a situation.

3.2. ANALYSIS OF FIELD MEASUREMENTS

During measurements performed on the section with noise barriers located at the distance of less than 3.8 m from the track axis, the greatest dynamic impact was registered in the case of passage of a passenger train with a nonaerodynamically shaped EP09 locomotive. The recorded accelerations of the column are presented in Fig. 7. A comparison of displacements obtained indirectly (double integration) and interferometric radar measurements is shown in Fig. 9. A comparison of displacements of two columns and a panel located between them is presented in Fig. 12. Analogous parameters determined for the passage of a streamlined passenger multiple-unit train ED250 at 160 km/h are presented in Figs 8, 10 and 13.

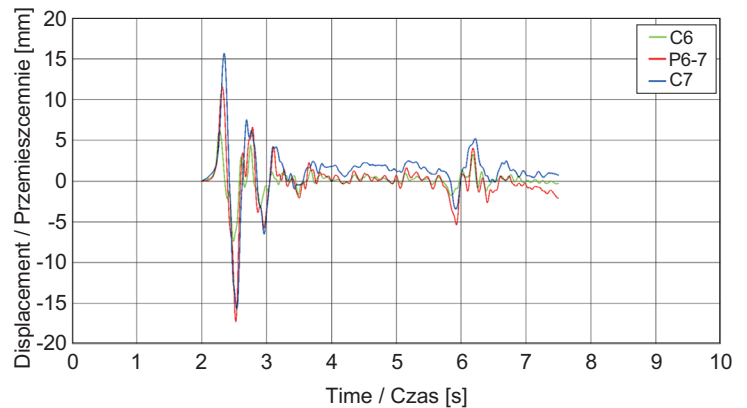


Fig. 12. The first section: displacements of column no. 6, panel no. 6-7 and column no. 7 during the passage of a passenger train with EP09 locomotive at the speed of 160 km/h
Rys. 12. Pierwszy badany odcinek: przebieg przemieszczeń słupa nr 6, panelu 6-7 i słupa 7 podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego z lokomotywą EP09

The first part of Table 1 presents a comparison of ΔD and ΔT parameters characterizing the dynamic impact of representative trains on the section with considerably damaged noise barriers located closer than 3.8 m to the track axis.

Zestawienie parametrów ΔD i ΔT charakteryzujących oddziaływania dynamiczne reprezentatywnych pociągów na odcinku z ekranami w odległości równej około 4,6 m od osi toru przedstawiono w drugiej części Tabl. 1.

Table 1. Comparison of ΔD and ΔT parameters characterizing the dynamic impact of trains on the two sections: with noise barriers located closer than 3.8 m from the track axis and at the distance of 4.6 m from the track axis
 Tablica 1. Zestawienie parametrów ΔD i ΔT charakteryzujących oddziaływania dynamiczne pociągów na odcinku z ekranami umieszczonymi w odległości od osi toru poniżej 3,8 m i w odległości od osi toru równej 4,6 m

Train type Rodzaj pociągu	Aerodynamic shape Aerodynamiczny kształt czoła pociągu	Speed Prędkość przejazdu [km/h]	Peak-to-peak extreme displacements Przedział ekstremalnych przemieszczeń ΔD [mm]		Time interval of the slope of the first peak Przedział czasu zbocza pierwszego piku ΔT [s]
			Columns / Słupy	Panels / Panele	Panels / Panele
Section with barriers located at the distance of less than 3.8 m from the track axis Odcinek z ekranami w odległości od osi toru poniżej 3,8 m					
Train with cars and EP09 locomotive Pociąg z wagonami i lokomotywą EP09	No / Nie	160	8 - 32	18 - 30	0.18
Multiple-unit train ED250 Pociąg zespolony ED250	Yes / Tak	160	4 - 15	6 - 15	0.17; 0.16
Multiple-unit train ED160 Pociąg zespolony ED160	Medium / Średni	160	4 - 18	9 - 16	0.19
Train with cars and EU07 locomotive Pociąg z wagonami i lokomotywą EU07	No / Nie	120	6 - 7	8 - 9	0.31
Section with barriers located at the distance of 4.6 m from the track axis Odcinek z ekranami w odległości od osi toru równej 4,6 m					
Train with cars and EU44 locomotive Pociąg z wagonami i lokomotywą EU44	No / Nie	160	4 - 9	8 - 11	0.12
Multiple-unit train ED250 Pociąg zespolony ED250	Yes / Tak	160	1 - 6	5 - 6	0.13; 0.16
Multiple-unit train ED160 Pociąg zespolony ED160	Medium / Średni	160	3 - 8	6 - 10	0.13; 0.16; 0.18

Na Rys. 14 i 15 przedstawiono kolejno przebiegi przemieszczeń i przyspieszeń słupów i paneli będące efektem pomierzonych największych oddziaływań aerodynamicznych spowodowanych przez przejazd pociągu na drugim badanym odcinku (ekran bez uszkodzeń usytuowany w odległości równej około 4,6 m od osi toru). Zarejestrowano je podczas przejazdu pociągu osobowego z lokomotywą EU44, o kształcie nieaerodynamicznym (Eurosprinter ES64U4). W czasie badań występowały znaczne podmuchy wiatru, które według danych ze stacji meteorologicznej przekraczały 30 km/h. Na Rys. 15 pokazano dłuższy czas rejestracji przyspieszeń drgań po przejeździe pociągu, z widocznymi drganiami spowodowanymi podmuchami wiatru.

Zestawienie parametrów ΔD i ΔT charakteryzujących oddziaływania dynamiczne reprezentatywnych pociągów na odcinku z ekranami w odległości równej około 4,6 m od osi toru przedstawiono odpowiednio w drugiej części Tabl. 1.

Figs 14 and 15 show displacements and accelerations of columns and panels resulting from the greatest aerodynamic impact induced on the second section (undamaged barrier situated approx. 4.6 m from the track axis). They were registered during the passage of a passenger train with a nonaerodynamically shaped EU44 locomotive (Eurosprinter ES64U4). Significant gusts of wind occurred during the measurements, reaching the speed of over 30 km/h according to the data from a meteorological station. Fig. 15 covers a longer acceleration measurement time after the passage of the train, with visible wind-induced vibrations.

A comparison of ΔD and ΔT parameters determined on the section with undamaged barriers located approx. 4.6 m from the track axis is shown in the second part of Table 1, respectively.

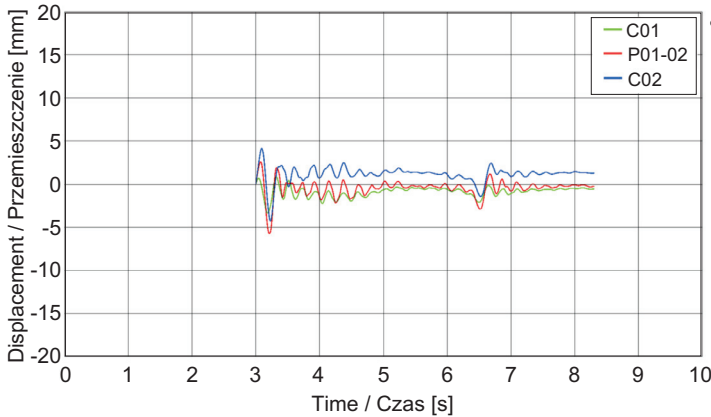


Fig. 14. The second section: displacements of column no. 01, panel no. 01-02 and column no. 02 during the passage of a passenger train with EU44 locomotive at the speed of 160 km/h
Rys. 14. Drugi badany odcinek: Przebieg przemieszczeń słupa nr 01, panelu 01-02 i słupa 02 podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego z lokomotywą EU44

Ze względu na niewystępowanie przejazdów pociągów tego samego typu z różnymi prędkościami nie przeprowadzono analizy wielkości oddziaływań aerodynamicznych w zależności od prędkości przejazdu pociągu. Na odcinku z ekranami w odległości poniżej 3,8 m od osi toru w przypadku pociągów przejeżdżających z prędkościami około 120 km/h wyznaczone maksymalne wartości ΔD drgań słupów spowodowane przez przejazd pociągu z lokomotywą nie przekraczały 7 mm. Oznacza to, że ekstremalne amplitudy drgań spowodowane przez pociągi przejeżdżające z prędkościami około 120 km/h były niższe od ekstremalnych amplitud drgań występujących na odcinku z ekranami w odległości równej około 4,6 m od osi toru i zarejestrowanych przy prędkościach pociągów równych 160 km/h. Na tej podstawie można przypuszczać, że przy odległości 3,8 m i prędkości pociągu 120 km/h nie powstają drgania ekranów powodujące ich uszkodzenia.

$$d_{pCi}(t) = d_{pi}(t) - \frac{d_{Ci}(t) - d_{Ci+1}(t)}{2}, \quad (5)$$

gdzie:

$d_{pi}(t)$ – przemieszczenia panelu względem zewnętrznego układu odniesienia,

$d_{pCi}(t)$ – przemieszczenia panelu względem punktów jego zamocowania w słupach,

$d_{Ci}(t), d_{Ci+1}(t)$ – przemieszczenia słupów nr i oraz $i+1$.

Na Rys. 16 i 17 przedstawiono przebiegi przemieszczeń paneli względem zewnętrznego układu odniesienia oraz względem punktów zamocowania w słupach. Wybrano przejazdy pociągów wywołujących ekstremalne drgania. Amplitudy

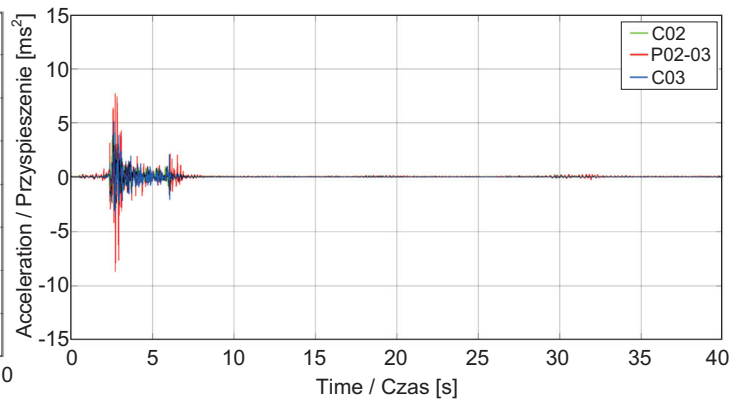


Fig. 15. The second section: accelerations of column no. 02, panel no. 02-03 and column no. 03 during the passage of a passenger train with EU44 locomotive at the speed of 160 km/h; the effect of gusts of wind visible before and after the passage of the train
Rys. 15. Drugi badany odcinek: przebieg przyspieszeń drgań słupa nr 02, panelu 02-03 i słupa 03 podczas przejazdu z prędkością 160 km/h pociągu osobowego z lokomotywą EU44; przed i po przejechaniu pociągu widoczne efekty oddziaływań podmuchów wiatru

Due to the fact that trains of a given type travelled the track at one speed only, comparative analysis of relationship between aerodynamic impact and train speed was not performed. On the section with noise barriers located closer than 3.8 m to the track axis, the determined maximum peak-to-peak values ΔD of column vibration resulting from passage of trains with locomotive at speeds of approx. 120 km/h did not exceed 7 mm. Therefore, the extreme amplitudes of vibrations caused by trains passing at approx. 120 km/h were lower than the extreme vibration amplitudes occurring on the section with barriers located 4.6 m from the track axis and registered at passage speeds of 160 km/h. Based on this observation, it may be assumed that at the distance of 3.8 m and train speed of 120 km/h the excited vibrations do not cause damage to the noise barriers.

$$d_{pCi}(t) = d_{pi}(t) - \frac{d_{Ci}(t) - d_{Ci+1}(t)}{2}, \quad (5)$$

where:

$d_{pi}(t)$ – displacement of the panel in relation to an external reference system,

$d_{pCi}(t)$ – displacement of the panel in relation to the fastening points on the columns,

$d_{Ci}(t), d_{Ci+1}(t)$ – displacements of the columns no. i and $i+1$.

Figs 16 and 17 show the displacements of a panel in relation to an external reference system and in relation to its fastening points on the columns. Train passages resulting

drgań paneli względem punktów mocowania są znacznie mniejsze od amplitud drgań słupów. Drgania te stanowią około 20-40% amplitud drgań wyznaczonych w zewnętrznym układzie odniesienia, a zatem w przypadku drgań górnych paneli dominujące były drgania związane z drganiami słupów.

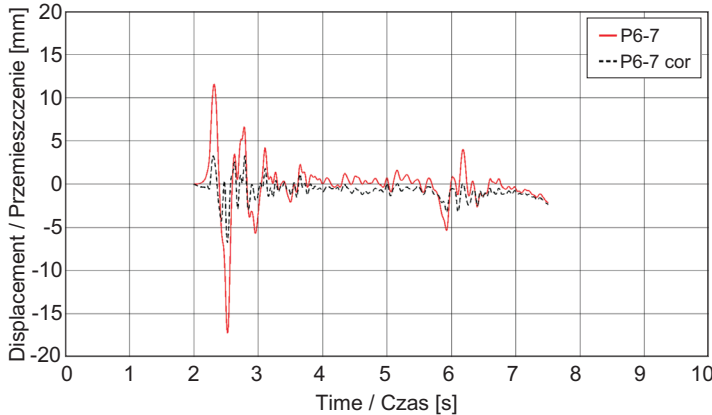


Fig. 16. The first section: comparison of panel displacements in an external reference system (P6-7) and relative to the fastening points on columns (P6-7 cor) during the passage of a passenger train with EP09 locomotive at the speed of 160 km/h

Rys. 16. Pierwszy badany odcinek: przebieg przemieszczeń panelu w zewnętrznym układzie odniesienia (P6-7) oraz w układzie względem punktów mocowania w słupach (P6-7 cor) podczas przejazdu pociągu osobowego z lokomotywą EP09 z prędkością 160 km/h

W związku z tym do porównania efektów oddziaływań dynamicznych przyjęto maksymalne przedziały ekstremalnych przemieszczeń ΔD wyznaczone w przypadku drgań słupów. Obliczono ilorazy parametrów ΔD wyznaczonych na odcinku z ekranami w odległości od osi toru poniżej 3,8 m przez odpowiednie parametry ΔD wyznaczone na odcinku z ekranami w odległości 4,6 m od osi toru (Tabl.1):

$$\frac{32}{9} \approx 3,5 \quad \text{– pociągi z wagonami i lokomotywą,}$$

$$\frac{15}{6} \approx 2,5 \quad \text{– pociągi zespolone ED250,}$$

$$\frac{18}{8} \approx 2,3 \quad \text{– pociągi zespolone ED160.}$$

Wyznaczone ilorazy wskazują, że znacznie wyższy poziom drgań (ekstremalnych amplitud drgań przy podobnym wymuszeniu) występuje w przypadku ekranów znajdujących się w odległości 3,8 m od osi toru niż w przypadku ekranów ustawionych w odległości 4,6 m.

Wyznaczony w ten sposób iloraz parametrów ΔD jest również znacznie większy niż iloraz odpowiednich obliczonych wartości współczynnika C_p [8, 15]:

in the extreme vibrations were selected. The vibration amplitudes of panels relative to fastening points are significantly lower than the vibration amplitudes of columns. Panel vibrations constitute approx. 20-40% of the total vibration amplitudes determined in an external reference system. Therefore, in the case of measurements performed on the upper panels, the vibration component coming from the columns was dominant.

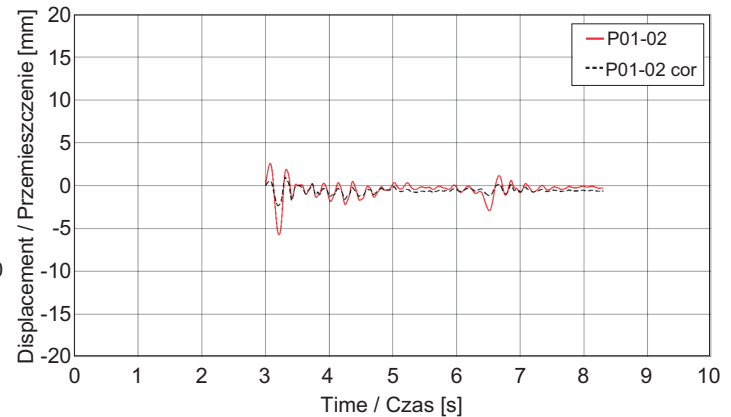


Fig. 17. The second section: comparison of panel displacements in an external reference system (P01-02) and relative to the fastening points on columns (P01-02 cor) during the passage of a passenger train with EU44 locomotive at the speed of 160 km/h

Rys. 17. Drugi badany odcinek: przebieg przemieszczeń panelu w zewnętrznym układzie odniesienia (P01-02) oraz w układzie względem punktów mocowania w słupach (P01-02 cor), podczas przejazdu pociągu osobowego z lokomotywą EU44 z prędkością 160 km/h

Consequently, the peak-to-peak extreme displacement differences ΔD determined for vibrations of the columns were taken into account in further comparisons of the dynamic effect. The ratio of ΔD parameters determined on the section with barriers located closer than 3.8 to the track axis to the corresponding ΔD parameters determined on the section located 4.6 from the track axis (Table 1) was calculated:

$$\frac{32}{9} \approx 3.5 \quad \text{– trains consisting of separate cars and locomotive,}$$

$$\frac{15}{6} \approx 2.5 \quad \text{– ED250 multiple-unit trains,}$$

$$\frac{18}{8} \approx 2.3 \quad \text{– ED160 multiple-unit trains.}$$

The determined ratios indicate that a significantly higher level of vibrations (peak-to-peak amplitude of vibration) occurs in the case of noise barriers located at the distance of 3.8 m from the track axis than in the case of barriers located 4.6 m from the track axis.

$$\frac{C_p(a_g = 3,8)}{C_p(a_g = 4,6)} = 1,33, \quad (6)$$

przy czym:

$$C_p = \frac{1,5}{(a_g + 0,25)^2} + 0,02, \quad (7)$$

gdzie:

C_p – współczynnik stosowany do obliczania ciśnienia aerodynamicznego,

a_g – odległość od osi toru [m].

Powyższe wnioski z badań są zbliżone do wniosków sformułowanych w [10], gdzie również na podstawie badań stwierdzono, że współczynnik C_p wyznaczony zgodnie z równaniem (7) jest znacznie zaniżony przy odległości od osi toru $a_g = 3,4$ m. Należy zaznaczyć, że obliczony zgodnie z normą iloraz w równaniu (6) dotyczy wartości samego ciśnienia aerodynamicznego przy podanych odległościach od osi toru, zaś wyznaczony w czasie badań stosunek dotyczy efektów oddziaływania tego ciśnienia.

Na podstawie Tabl. 1 obliczono również ilorazy parametrów ΔD wyznaczonych podczas przejazdu pociągu o aerodynamicznym (opływowym) kształcie czoła pociągu (ED250) do wyznaczonych podczas przejazdu pociągu z lokomotywą (EP09 lub EU44):

$$\frac{15}{32} \approx 0,47 \text{ – odcinek z } a_g \leq 3,8 \text{ m,}$$

$$\frac{6}{9} \approx 0,67 \text{ – odcinek z } a_g = 4,6 \text{ m.}$$

Podany w normie [15] współczynnik zmniejszający wartości charakterystyczne oddziaływań na ekrany przy przejeździe taboru opływowego w stosunku do taboru z niekorzystnym kształtem aerodynamicznym jest równy 0,6, a więc jest w przybliżeniu zgodny z wyznaczonymi wartościami.

Wyznaczone parametry ΔT zostały przeanalizowane po wyznaczeniu w ramach badań laboratoryjnych częstotliwości drgań własnych paneli w celu określenia możliwości wystąpienia rezonansu (rozdział 3.3 w artykule).

Podczas inspekcji ekranów stwierdzono pęknięcia w narożnikach kątowników w miejscach koncentracji naprężeń oraz na ściankach kątowników w pobliżu nitów. Ekran zostały wybudowane w 2014 roku i w tym czasie maksymalna prędkość pociągów była równa 120 km/h. Po roku eksploatacji nie zaobserwowano uszkodzeń paneli ekranów. W 2015 roku zwiększono maksymalną prędkość rozkładową pociągów do 160 km/h. Po około półtora roku eksploatacji ze zwiększoną prędkością przejazdów zaobserwowano liczne uszkodzenia

The ratio of ΔD parameters determined in this manner is also significantly greater than the ratio of corresponding values of the C_p coefficient [8, 15]:

$$\frac{C_p(a_g = 3.8)}{C_p(a_g = 4.6)} = 1.33, \quad (6)$$

wherein:

$$C_p = \frac{1.5}{(a_g + 0.25)^2} + 0.02, \quad (7)$$

where:

C_p – coefficient used in aerodynamic pressure calculations,

a_g – distance from the track axis [m].

The above conclusions are similar to those formulated in [10], which – also based on performed investigations – stated that the C_p coefficient calculated according to equation (7) was significantly underestimated at the distance from the track axis of $a_g = 3.4$ m. It should be emphasized that the ratio calculated according to the standard – equation (6) – pertains to the values of aerodynamic pressure itself, whereas the ratio of ΔD determined in the course of the presented research reflects the influence of this pressure on the structure.

Based on Table 1, the ratio of ΔD parameters determined for the passage of a streamlined train (ED250) to ΔD parameters determined for the passage of train with nonaerodynamic locomotive (EP09 or EU44) was calculated as well:

$$\frac{15}{32} \approx 0.47 \text{ – section with } a_g \leq 3.8 \text{ m,}$$

$$\frac{6}{9} \approx 0.67 \text{ – section with } a_g = 4.6 \text{ m.}$$

The factor of aerodynamic shape of trains given in the standard [15], which reduces the characteristic values of actions on noise barriers during the passage of a fully streamlined train in comparison to trains with unfavorable shape, equals 0.6, which is generally consistent with the obtained results.

The determined ΔT parameters were analyzed after the natural frequency of panels had been investigated in laboratory tests, in order to assess the possibility of occurrence of resonance (section 3.3 in this paper).

During the field inspection of the barriers, cracks were observed in the corners of profiles (in the locations of stress concentration) and in the walls of profiles in the vicinity of rivets. The barriers were constructed in 2014, at which

paneli. Na podstawie porównania efektów oddziaływań aerodynamicznych pociągów przejeżdżających z prędkościami około 120 km/h i 160 km/h na dwóch badanych odcinkach, można założyć, że do pojawienia się uszkodzeń paneli doszło na skutek eksploatacji linii kolejowej przez pociągi o nieaerodynamicznym kształcie osiągające maksymalną prędkość 160 km/h. Ustalono, że w ciągu półtora roku przejechało łącznie w przybliżeniu 43 000 pociągów, w tym około 3 500 pociągów o nieaerodynamicznym kształcie z prędkością 160 km/h. Taka graniczna liczba cykli obciążenia występuje w przypadku zmęczenia niskocyklowego [17], które najprawdopodobniej jest przyczyną pojawienia się uszkodzeń ekranów zamontowanych w odległości mniejszej niż 3,8 m od osi toru.

3.3. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne przeprowadzono na nieuszkodzonych panelach wyjętych z konstrukcji ekranów. Sprawdzone odporność paneli na obciążenia poziome równomiernie rozłożone (tj. działanie wiatru lub przejeżdżających pociągów) oraz wykonano pomiary częstotliwości drgań z wykorzystaniem młotka modalnego i analizy widmowej.

Badania odporności paneli na obciążenia poziome wykonywano na trzech panelach (dwóch przystosowanych do rozstawu słupów 5 m i jednego przystosowanego do rozstawu 4 m). Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN 1794-1 [18]. Polegały one na pomiarze dopuszczalnego ugięcia (paneli względem słupów) pod obciążeniem równomiernie rozłożonym (Rys. 18). Wyniki badań zestawiono w Tabl. 2. Maksymalne obciążenia poziome panelu przystosowanego do rozstawu słupów 5 m wyniosły $0,97 \text{ kN/m}^2$ (pomierzone ugięcie odwracalne wyniosło 30,53 mm, trwałe zaś 4,30 mm).

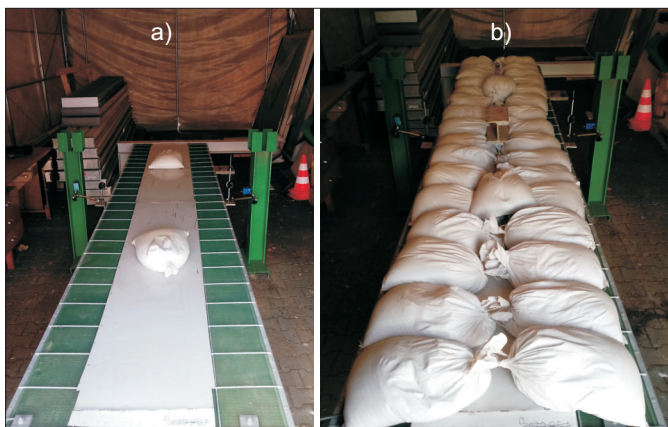


Fig.18. Static testing of a panel installed horizontally on supports and subjected to standard train loading simulated using bags filled with pellets: a) initial loading, b) maximum permissible loading
Rys. 18. Badania statyczne panelu zamocowanego poziomo w podporach, poprzez symulowanie za pomocą worków ze śrutem obciążenia normowego wywołanego przez przejeżdżające pociągi: a) obciążenie wstępne, b) maksymalne dopuszczalne

time the maximum train speed equaled 120 km/h. After a year of service no distress was observed. In 2015 the train operational speed was increased to 160 km/h. Approximately a year and a half later numerous panel defects were noticed. Based on comparison between the aerodynamic effect induced by trains passing at the speeds of approx. 120 km/h and 160 km/h on the two investigated sections, it may be assumed that the panels were damaged due to operation of nonaerodynamically shaped trains reaching the maximum speed of 160 km/h on the line. It was established that during the mentioned period of a year and a half a total number of 43,000 trains traveled the line, including 3,500 nonaerodynamically shaped trains moving at 160 km/h. Such a number of load cycles may exceed the limit value in the case of low-cycle fatigue [17], which probably was the cause of damage of noise barriers situated at the distance of less than 3.8 m from the track axis.

3.3. LABORATORY TESTS

Laboratory testing was performed on undamaged panels extracted from barrier structures. The resistance of panels to horizontal uniformly distributed loads (i.e. impact of wind or passing trains) was tested. Vibration frequencies were measured as well, using a modal impact hammer and spectrum analysis.

Horizontal load resistance of panels was tested on three panels (two suitable for 5 m span and one suitable for 4 m span). The tests were performed according to the PN-EN 1794-1 standard [18]. The test consists in measurement of deflection (of panels relative to the columns) under a uniformly distributed load (Fig. 18). The results are presented in Table 2. The maximum horizontal distributed load of panel for 5 m span equaled 0.97 kN/m^2 (the measured reversible deflection was 30.53 mm, while permanent deflection was 4.30 mm).

Vibration frequency measurements using modal impact hammer and spectrum analysis (Fig. 19) were performed on a panel suitable for 5 m span. The determined free vibration frequencies f_{fv} was:

- 5.3 - 5.6 Hz for the first vibration frequency,
- 10.6 - 11.2 Hz for the second vibration frequency.

Pomiary częstotliwości drgań z wykorzystaniem młotka modalnego i analizy widmowej (Rys. 19) przeprowadzono na panelu przystosowanym do rozstawu słupów co 5 m. Wyznaczone częstotliwości drgań swobodnych f_{fv} panelu wynosiły:

- 5,3 - 5,6 Hz przy pierwszej częstotliwości drgań,
- 10,6 - 11,2 Hz przy drugiej częstotliwości drgań.



Fig. 19. Vertically installed panel during dynamic testing using modal impact hammer; accelerometers mounted on the top part of the panel

Rys. 19. Panel zamocowany pionowo w podporach podczas badania dynamicznego poprzez uderzenie młotkiem modalnym, w górnej części panelu zainstalowano akcelerometry

Rozrzuty częstotliwości drgań swobodnych wynikały z luzowania się elementów usztywniających mocowanie panelu w słupach. Wyznaczone częstotliwości drgań f_{fv} należy porównać z częstotliwościami rezonansowymi wzbudzenia f_r , wyznaczonymi na podstawie przedziału czasu ΔT z boczka pierwszego piku z Tabl. 1:

$$f_r = \frac{1}{2\Delta T} \quad (8)$$

Zakres ΔT od 0,16 s do 0,19 s (odcinek z ekranami w odległości od osi toru poniżej 3,8 m) odpowiada częstotliwościom rezonansowym od 2,6 Hz do 3,1 Hz. Oznacza to, że przy maksymalnych zarejestrowanych prędkościach przejazdu pociągów (160 km/h) zjawisko rezonansu nie powinno wystąpić.

Table 2. The results of characteristic uniformly distributed load tests of panels for 5 m span (no. 1 and 2) and 4 m span (no. 3) Tablica 2. Zestawienie wyników badania wartości obciążenia równomiernego charakterystycznego paneli przystosowanych do rozstawu słupów 5 m (nr 1 i 2) oraz 4 m (nr 3)

No. Nr	Panel dimensions Wymiary panelu [mm]	Uniformly distributed load Wartość obciążenia równomiernego [kN/m ²]	Deflection / Ugięcia [mm]	
			Reversible Odwracalne	Permanent Trwałe
1	4950 × 1000 × 122 ^{*)}	0.97	30.53	4.30
2	4950 × 1000 × 122	1.01	29.46	3.16
3	3950 × 1000 × 122	1.42	20.01	4.00

^{*)} loading increased gradually, method modified in relation to the standard [18]
obciążenie zwiększane krokowo, metoda zmodyfikowana względem normy [18]

The dispersion of free vibration frequencies resulted from loosening of elements that fastened the panel to the columns. The determined frequencies f_{fv} should be compared to the resonant frequencies f_r of the driving force, obtained on the basis of the ΔT time of the slope of the first peak from Table 1:

$$f_r = \frac{1}{2\Delta T} \quad (8)$$

The range of ΔT from 0.16 s to 0.19 s (the section with barriers located closer than 3.8 m to the track axis) corresponds to resonant frequencies of 2.6 Hz to 3.1 Hz, which means that at the maximum recorded train speed (160 km/h) the phenomenon of resonance should not occur.

4. CONCLUSIONS

Based on the performed field and laboratory research, conclusions were formulated pertaining to the relationships given in the literature and standards for the magnitude of dynamic impact depending on the distance of the barrier from the track axis and the shape of the nose of the passing train. Noise barriers that were located at the distance of less than 3.8 m from the track axis were subjected to levels of vibration 2 to 3 times greater than noise barriers of the same type located 4.6 m from the track axis. Such a level of vibration is greater than the levels accepted in the standards. The impact of a nonaerodynamically shaped train with a locomotive is approximately 2 times greater than the impact of a multiple-unit train with a streamlined nose shape, which is consistent with the provisions of the standards.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych i laboratoryjnych sformułowano spostrzeżenia związane z prezentowanymi w literaturze i normach zależnościami wielkości oddziaływań dynamicznych od odległości między ekranem a osią toru oraz od kształtu czoła przejeżdżającego pociągu. Ekran, które znajdowały się w odległości poniżej 3,8 m od osi toru, charakteryzowały się poziomem drgań od 2 do 3 razy większym niż ekran tego samego typu, które znajdowały się w odległości 4,6 m. Jest to poziom większy niż podany w normach. Oddziaływania pociągu z lokomotywą przy tej samej prędkości przejazdu są około 2 razy większe niż pociągu zespolonego o aerodynamicznym kształcie czoła pociągu, co potwierdza zapisy normowe.

Zbadano przyczynę występowania uszkodzeń ekranów, które znajdowały się w odległości poniżej 3,8 m od osi toru. Dopuszczalne obciążenia poziome określone na podstawie badań laboratoryjnych zgodnie z normą [18] wynoszą $0,97 \text{ kN/m}^2$ (przy rozstawie osiowym słupów nośnych 5 m). Obciążenia wywołane przez pociągi przejeżdżające z prędkością 160 km/h na ekrany umiejscowione w odległości 3,66 m od osi toru wynoszą $0,48 \text{ kN/m}^2$ wg normy [15], a zatem nie przekraczają dopuszczalnego maksimum – panele zostały jednak uszkodzone. Zaobserwowane uszkodzenia paneli mają charakter zmęczeniowy. Jednocześnie należy zauważyć, że norma [15] w przypadku konstrukcji wrażliwych na oddziaływania dynamiczne wskazuje możliwość zwiększenia wartości współczynnika dynamicznego za pomocą „specjalnej analizy”, w której należy uwzględnić m.in. warunki podparcia elementów oraz odpowiedź dynamiczną konstrukcji.

Zjawisko uszkodzeń zmęczeniowych badanych ekranów występowało przy stosunkowo niskich prędkościach przejazdu pociągów (do 160 km/h) w porównaniu do prezentowanych w światowej literaturze oddziaływań pociągów na liniach wysokiej prędkości (250-350 km/h). Może to wynikać ze znacznej podatności badanych ekranów na oddziaływania zmęczeniowe (zmiennego znaku). W przypadku takich ekranów ich stosowanie powinno uwzględniać odległość od osi toru oraz prędkości i rodzaje przejeżdżających pociągów. Oprócz prowadzenia analizy wytrzymałości doraźnej konieczna jest analiza wytrzymałości zmęczeniowej.

INFORMACJE DODATKOWE

Prezentowane badania zostały wykonane w ramach ekspertyzy realizowanej na zamówienie PKP PLK SA oraz prac własnych IBDiM.

The cause of damage was investigated for barriers situated closer than 3.8 m from the track axis. The acceptable horizontal loads determined in laboratory tests according to the standard [18] equaled 0.97 kN/m^2 (for the 5 m span of support columns). According to the standard [15], the loading from trains passing at the speed of 160 km/h equaled 0.48 kN/m^2 for barriers located at the distance of 3.66 m from the track axis, therefore it was below the acceptable maximum – the damage of the panels, however, did occur. The observed distress of the panels has a fatigue character. It should be noted that for structures susceptible to dynamic effects the standard [15] provides a possibility of increasing the value of the dynamic factor based on a “special study”, which should include, among other factors, the support arrangement and the dynamic response of the structure.

Fatigue distress of the tested barriers occurred at relatively low train speeds (max. 160 km/h), compared to the train dynamic impacts presented in the international literature for high speed lines (250-350 km/h). This may be due to significant susceptibility of the tested noise barriers to fatigue loading (alternating loads). When such barriers are used, the design should take into account their distance from the track axis as well as the speeds and the types of the passing trains. Besides the ultimate strength analyses, it is necessary to perform fatigue strength analyses as well.

ACKNOWLEDGEMENT

The presented tests were performed within the scope of an expert evaluation commissioned by the Polish national railway infrastructure manager PKP PLK SA as well as within the scope of the own works of the Road and Bridge Research Institute.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Szafrański M.*: Dynamic analysis of the railway bridge span under moving loads. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 4, 2018, 299-316, DOI: 10.7409/rabdim.018.019
- [2] *Thompson D.*: *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier; 2009
- [3] *Janas L.*: *Badania wibroakustyczne mostu blachownicowego*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie Serbia: *Materiały Konferencyjne*, **106**, 2, 2015, 47-60

- [4] *Li Y., Li Z.*: Application Effect of Chinese High-Speed Railway Noise Barriers. Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, 12-16 September 2016, Terrigal, Australia, in book: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, part of: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multi-disciplinary Design, Springer, Cham, **139**, 2018, 423-430, DOI: 10.1007/978-3-319-73411-8_32
- [5] *Kurze U.J.*: Tools for measuring, predicting and reducing the environmental impact from railway noise and vibration. Journal of Sound and Vibration, **193**, 1, 1996, 237-251, DOI: 10.1006/jsvi.1996.0264
- [6] *Pietrzak K., Tokarski Z., Kowalski K.J.*: Assessment of the traffic noise reduction when using tramway screening. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 2, 2018, 127-139, DOI: 10.7409/rabdim.018.008
- [7] *Janas L., Łakota W.*: Analysis of possibilities of noise reduction in the vicinity of steel bridge and railway line. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **4**, 2, 2005, 71-90
- [8] *Tokunaga M., Sogabe M., Santo T., Ono K.*: Dynamic response evaluation of tall noise barrier on high speed railway structures. Journal of Sound and Vibration; **366**, 2016, 293-308, DOI: 10.1016/j.jsv.2015.12.015
- [9] *Zou Y., Fu Z., He X., Cai C., Zhou J., Zhou S.*: Wind Load Characteristics of Wind Barriers Induced by High-Speed Trains Based on Field Measurements. Applied Sciences, **22**, 9, 2019, 4865 (14p), DOI: 10.3390/app9224865
- [10] *Xiong X., Li A., Liang X., Zhang J.*: Field study on high-speed train induced fluctuating pressure on a bridge noise barrier. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **177**, 2018, 157-166, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.04.017
- [11] *Zhengqing Z., Zhiqiang C.*: Numerical simulation and experimental verification of dynamic pressure on noise barriers of high speed railways. Railway Standard Design, **11**, 2011, 77-80 (in Chinese)
- [12] *Friedl H., Reiterer M., Kari H.*: Aerodynamic excitation of noise barrier systems at high-speed rail lines – Fatigue analysis. Proceedings of 4th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC'11), 9-11 May 2011, Istanbul, Turkey, 692 p. (1 Vol.)
- [13] *Vittozzi A., Silvestri G., Genca L., Basili M.*: Fluid dynamic interaction between train and noise barriers on High-Speed-Lines. Procedia Engineering, **199**, 2017, 290-295, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.035
- [14] *Baker Ch., Jordan S., Gilbert T., Quinn A., Sterling M., Johnson T., Lane J.*: Transient aerodynamic pressures and forces on trackside and overhead structures due to passing trains. Part 1: Model-scale experiments; Part 2: Standards applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, **228**, 1, 2014, 37-70
- [15] PN-EN 1991-2:2007 - Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje - Część 2: Obciążenia ruchome mostów
- [16] *Gentile C., Bernardini G.*: An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. Structure and Infrastructure Engineering, **6**, 5, 2010, 521-534, DOI: 10.1080/15732470903068557
- [17] *Borrego L.P., Abreu L.M., Costa J.M., Ferreira J.M.*: Analysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys. Engineering Failure Analysis, **11**, 5, 2004, 715-725, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2003.09.003
- [18] PN-EN 1794-1+AC:2019-02 Drogowe urządzenia przeciwhałasowe – Wymagania pozaakustyczne – Część 1: Właściwości mechaniczne i stateczność