

**Dr inż. Marek Płaczek, prof. dr hab. inż. Andrzej Buchacz,**

**dr inż. Andrzej Wróbel**

Institut Automatykacji Procesów Technologicznych  
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania

Wydział mechaniczny technologiczny

Politechnika Śląska

Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Polska

E-mail: andrzej.buchacz@polsl.pl, marek.placzek@polsl.pl, andrzej.wrobel@polsl.pl

### **Użycie Folia piezoelektrycznych jako narzędzi do monitorowania stanu technicznego wagonu towarowego w trakcie eksploatacji**

### **Use of piezoelectric foils as tools for structural health monitoring of freight cars during exploitation**

**Słowa kluczowe:** folie piezoelektryczne, monitorowanie stanu technicznego, badania nieniszczące, wagony towarowe

**Keywords:** piezoelectric foils, structural health monitoring, non-destructive testing, freight cars

**Abstrakt:** W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące zastosowania folii piezoelektrycznych do monitorowania stanu technicznego wagonów towarowych w trakcie ich eksploatacji. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych na utworzonym w skali modelu węglarki. Określono możliwość wykrycia zmian stanu technicznego wagonu na podstawie analizy jego odpowiedzi dynamicznej. W pierwszym etapie badań obiekt traktowano jako półokreślony, w celu wymuszenia drgań stosowano wahadło. Pomiar odpowiedzi dynamicznej układu w poszczególnych punktach pomiarowych przeprowadzono z użyciem akcelerometrów. Kolejnym etapem badań był pomiar odpowiedzi dynamicznej modelu w trakcie jazdy. W celu pomiaru drgań konstrukcji nośnej modelu zastosowano przetwornik piezoelektryczny typu Macro Fiber Composite (MFC), który naklejono na powierzchni modelu. Przeprowadzono ciąg badań modelu bez obciążenia oraz z obciążeniem, a także z przeszkodami umieszczonymi na jednej bądź obu szynach. Otrzymane przebiegi zestawiono na wykresach oraz omówiono wyniki badań.

**Abstract:** Work presents a task of piezoelectric foils application for structural health monitoring of freight cars during their exploitation. Results of laboratory tests conducted on a created in scale laboratory model of the freight car are presented. The possibility of inferred from the dynamic response of the model about the changes in its technical condition was verified. During the first test the model was treated as a half-determined system. In order to excite vibrations a pendulum was used. Measurements were carried out using accelerometers. During the next stage of carried out tests the dynamical response of the model was measured while the object was driving. In order to measure vibrations of the system a Macro Fiber Composite (MFC) piezoelectric foil was used. It was glued on the surface of the model. A series of tests of the model with and without load, as well as with an obstacle on the rail track was carried out. Measured signals were juxtaposed on charts and analysed.

## 1. Wprowadzenie

Transport kolejowy jest bardzo istotnym elementem współczesnej gospodarki, jednym ze składników warunkujących jej dynamiczny rozwój. Istotne jest więc prowadzenie badań i podejmowanie działań, których celem jest rozwój i udoskonalenie tej gałęzi przemysłu. Działania takie przekładają się bezpośrednio na wzrost jej efektywności, bezpieczeństwa, zmniejszenie uciążliwości dla środowiska naturalnego i społeczeństwa. Współcześnie prowadzone są liczne badania, których celem jest wprowadzenie nowych technologii i rozwiązań, zarówno w zakresie infrastruktury kolejowej, systemów zarządzania i logistyki, jak samych pojazdów trakcyjnych [1, 2, 4, 11, 14-17, 20, 22, 29, 32]. Wprowadzanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych umożliwia eliminację lub zmniejszenie uciążliwości problemów związanych z realizacją wszelkiego rodzaju transportu czy też eksploatacją środków technicznych w nim stosowanych [18, 19].

W niniejszej pracy zawarto sprawozdanie z części badań prowadzonych w ramach projektu badawczo rozwojowego zatytułowanego „Badania analityczne i eksperymentalne oraz określenie cech konstrukcyjnych podzespołów i zespołów w innowacyjnych konstrukcjach remontowanych wagonów towarowych”. Projekt ten realizowany jest w ramach Programu Badań Stosowanych przez Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Śląskiej wraz z konsorcjantami: firmą DB Schenker oraz Dom Samochodowy Germaz Sp. z o. o. Głównym celem projektu jest opracowanie technologii modernizacji wagonów towarowych przeznaczonych do przewozu węgla i kruszyw, poprzez zastosowanie innowacyjnych materiałów i technologii naprawczych tego typu wagonów podczas remontów okresowych. Działania, których realizacji podjęto się w ramach projektu mają na celu poprawę warunków eksploatacji rozpatrywanych typów wagonów poprzez zwiększenie ich odporności na korozję i przymarzanie przewożonego ładunku do poszycia pudła wagonu w okresie zimowym, a przez to łatwiejszy ich rozładunek. Dodatkowym celem jest także weryfikacja wytrzymałościowa modernizowanych wagonów, a także oszacowanie możliwości zmniejszenia ich masy, przy zachowaniu lub zwiększeniu dopuszczalnej ładowności. Jednym z elementów projektu jest także opracowanie systemu umożliwiającego diagnozowanie stanu technicznego zmodernizowanego poszycia pudła wagonu w trakcie eksploatacji. W tym celu planuje się zastosowanie nieniszczących metod badania stanu technicznego konstrukcji, w tym metod, w których stosowana jest analiza odpowiedzi dynamicznej rozpatrywanego obiektu. Prowadzone są więc badania, w których analizuje się możliwość zastosowania folii o właściwościach piezoelektrycznych w roli sensorów, stosowanych w systemie pomiaru drgań badanych obiektów. Prowadzone badania są kontynuacją wcześniejszych prac związanych z analizą możliwości zastosowania materiałów kompozytowych jako elementów poszycia pudła wagonów towarowych [1, 2]. Autorzy w swoich pracach podejmują ponadto zagadnienia związane z analizą i syntezą drgających układów mechanicznych i mechatronicznych, w tym takich, w których klasyczne lub nieklasyczne przetworniki piezoelektryczne stosowane są w roli wzbudników lub tłumików drgań [3, 5, 7-9, 26, 27, 31]. W Ośrodku Gliwickim prowadzone są ponadto szeroko zakrojone badania z zakresu analizy i syntezy układów mechanicznych i mechatronicznych [6, 12, 13, 21, 33].

## 2. Pomiar i badanie odpowiedzi dynamicznej elementów infrastruktury kolejowej

Zagadnienia związane z badaniem odpowiedzi dynamicznej, zarówno taboru kolejowego, jak i infrastruktury kolejowej są tematem podejmowanym przez wiele ośrodków badawczych. Obciążenia dynamiczne, generowane podczas przejazdu składów kolejowych działają szkodliwie na elementy infrastruktury, takie jak mosty czy budynki znajdujące się

w pobliżu torowiska, a także na przebywających w nich ludzi. Istnieje jednak możliwość ich zastosowania w systemach monitorowania stanu technicznego elementów infrastruktury [10, 14, 16, 25, 30]. Ze względu na obciążenia dynamiczne, generowane przez poruszające się z coraz wyższą prędkością pociągi, w obliczu starzejących się i wyeksploatowanych elementów infrastruktury, zagadnienia te stają się obecnie niezwykle istotne. W ostatnich latach zauważyć więc można znaczący wzrost zainteresowania tą tematyką, jak i wzrost liczby wykonywanych badań odbiorczych obiektów pod próbnym obciążeniem dynamicznym [28]. Jest to wynikiem działań związanych z realizacją programu modernizacji linii kolejowych i wprowadzenia w Polsce kolei dużych prędkości, a więc przewozów pasażerskich z prędkościami powyżej 200 km/h. Zagadnienia te omawiane są między innymi w pracach [14, 16, 25, 28], dotyczących oddziaływań dynamicznych pociągów dużych szybkości na mosty i wiadukty kolejowe, a także badań odbiorczych tego typu obiektów pod próbnym obciążeniem dynamicznym. Istotne są również zagadnienia ochrony zabudowy powierzchniowej przed drganiami generowanymi przez naziemną i podziemną komunikację szynową, jak i ochrony i minimalizacji wpływu tych drgań zarówno na pasażerów, jak i osoby przebywające w budynkach otaczających linię kolejową [30].

Celem omawianych prac badawczych autorów jest określenie możliwości identyfikacji stanu technicznego zmodernizowanego wagonu towarowego na podstawie ciągłego pomiaru jego odpowiedzi dynamicznej w trakcie eksploatacji. Założeniem jest utworzenie systemu zintegrowanego z elementami zmodernizowanego poszycia pudła wagonu i umożliwiającego generowanie sygnałów alarmowych, które będą mogły być odczytywane okresowo przez pracowników obsługi, bądź też przesyłane bezpośrednio po wystąpieniu, za pomocą bezprzewodowego systemu informatycznego. W roli sensorów zastosowane będą przetworniki piezoelektryczne w postaci folii, które zostaną zintegrowane z elementami modernizowanego poszycia wagonu.

Również w pracy [29] zaprezentowano założenia i działanie systemu monitorowania obciążeń i stanu technicznego kratownicowych mostów kolejowych, w którym w roli sensorów stosowane są przetworniki piezoelektryczne. W tym przypadku działanie systemu oparte jest na analizie sygnałów generowanych przez przetworniki piezoelektryczne zamontowane na szynach kolejowych przed wjazdem na most oraz na elementach samego mostu kratownicowego. Możliwa jest bezprzewodowa transmisja zmierzonych sygnałów do centrum obliczeniowego. System charakteryzuje się więc niskim kosztem instalacji i brakiem istotnych ograniczeń na rozkład ruchu taboru kolejowego w trakcie instalacji i działania. Wzmocniony i odfiltrowany sygnał pomiarowy może być interpretowany w celu identyfikacji obciążenia, a więc ważenia przejeżdżającego składu w ruchu, jak i monitorowania stanu technicznego samego mostu kratownicowego. Jak podają autorzy, prace badawcze mają na celu stworzenie zintegrowanego systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji i wykrywania przeciążonych składów kolejowych. Przedstawione założenia teoretyczne autorzy popierają prezentacją wyników przeprowadzonych pomiarów w postaci przebiegu sygnałów zarejestrowanych przez czujniki piezoelektryczne podczas przejazdu pociągu towarowego oraz odniesienia poziomu sygnału do masy wagonu, określonej za pomocą wagi statycznej. Otrzymane wartości umożliwiają jednoznaczną identyfikację rodzaju wagonu po wcześniejszej kalibracji systemu pomiarowego.

Rezultaty badań symulacyjnych i modelowych oddziaływania obciążenia statycznego i dynamicznego na wytrzymałość platformy kolejowej, stosowanej w systemach transportu kolejowo-drogowego z przeładunkiem poziomym, przedstawiono w pracy [10]. Omówiono proces modelowania i analizy z użyciem metody elementów skończonych platformy podwozia wagonu. Przeprowadzono weryfikację modelu, dokonując analizy statycznej i porównując jej rezultaty z wynikami eksperymentu na obiekcie rzeczywistym. Następnie, przeprowadzono analizę modalną oraz przedstawiono wyniki symulacji przejazdu

modelowanej ramy wagonu kolejowego obciążonej ładunkiem przez przeszkodę o wysokości 5 mm. Wyznaczono odpowiedź konstrukcji w postaci zmian przemieszczeń pionowych węzła środkowego modelu w połowie długości wagonu oraz towarzyszących im zmian naprężeń zredukowanych.

Pomiar odpowiedzi dynamicznej posadzki parteru budynku znajdującego się w sąsiedztwie tunelu metra warszawskiego stał się podstawą działania systemu monitoringu, dzięki któremu możliwa jest identyfikacja pociągów generujących nadmierne drgania w wyniku deformacji zużytych kół [30]. Autorzy prezentują porównanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań poziomych posadzki parteru budynku podczas przejazdu dwu pociągów tego samego typu o różnej wartości bicia promieniowego kół. Wykazano, że w przypadku taboru szynowego o zdeformowanych kołach możliwy jest kilkunastokrotny wzrost poziomu generowanych drgań. Udowodniono więc, że istnieje możliwość wnioskowania o stanie technicznym taboru kolejowego na podstawie analizy odpowiedzi dynamicznej elementów infrastruktury na wymuszenia spowodowane jego przejazdem. Autorzy niniejszej pracy przyjęli założenie, że system taki może być z powodzeniem zintegrowany z modernizowanym wagonem towarowym i umożliwić monitorowanie jego stanu technicznego w trakcie eksploatacji. Próbę oszacowania sił oddziałujących na zestawy kołowe pojazdów szynowych na podstawie zmierzonej odpowiedzi dynamicznej przedstawiono także w pracy [23]. Stosując opracowany model wagonu oraz metodę elementów skończonych, wyznaczano siły oddziałujące na obiekt badań, będące wynikiem deformacji toru kolejowego.

### **3. Obiekt badań, jego model i stanowisko pomiarowe**

Przedmiotem badań jest czteroosiowy wagon towarowy budowy normalnej, typu EAOS 1415-A3, produkcji BREC Belgia. Na Rys. 1 przedstawiono rozpatrywany wagon towarowy po przeprowadzonym remoncie okresowym oraz jego model utworzony w programie klasy CAx. Model CAD wagonu utworzono na podstawie dokumentacji dostarczonej przez konsorcjanta – firmę DB Schenker, obejmującej jedenaście rysunków konstrukcyjnych wagonu oraz dokumentację techniczno-rozruchową, warunki techniczne wykonania napraw i odbioru po naprawie, obliczenia hamulca pneumatycznego, program i sprawozdanie z prób eksploatacyjnych. Brakujące dane dotyczące rozpatrywanego obiektu uzyskano podczas oględzin i pomiarów obiektów rzeczywistych oraz konsultacji z personelem technicznym, odpowiedzialnym za przeprowadzanie remontów i prób technicznych.

W trakcie przeprowadzonych konsultacji ustalono, że typowymi problemami w trakcie eksploatacji tego typu wagonu towarowego są:

- korozja poszycia pudła wagonu oraz podłogi,
- przymarzanie przewożonego ładunku do poszycia pudła w warunkach zimowych,
- uszkodzenia mechaniczne poszycia pudła, powstałe w trakcie zastosowania niewłaściwych metod rozładunku (wagon przeznaczony jest do rozładunku z użyciem wywrotnic).

Weryfikacji poprawności wykonania modelu CAD rozpatrywanego wagonu towarowego dokonano poprzez porównanie masy obiektu rzeczywistego i modelu po nadaniu własności materiałowych. Otrzymana niedokładność wynosi 5,34% i jest wynikiem nie uwzględnienia w modelu elementów układu hamulcowego. Opracowany model CAD stosowano następnie w celu przeprowadzenia ciągu analiz z użyciem oprogramowania klasy CAx, takich jak analiza modalna, wytrzymałościowa, czy też wyznaczenie maksymalnej prędkości przejazdu wagonu załadowanego lub pozbawionego ładunku po łuku o określonym promieniu krzywizny.

a)



b)



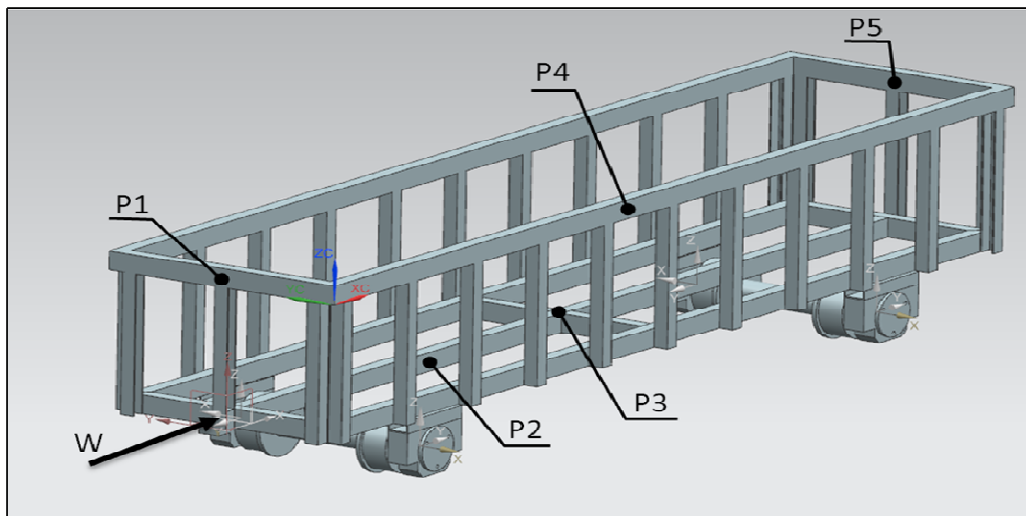
Rys. 1. Węglarka typu EAOS 1415-A3 (a) oraz jej model CAD (b)

W celu przeprowadzenia badań dotyczących analizy odpowiedzi dynamicznej wagonu towarowego na wymuszenia i oszacowania możliwości wnioskowania na jej podstawie o stanie technicznym obiektu, utworzono stanowisko laboratoryjne, które pokazano na Rys. 2. Wykonano uproszczony model ustroju nośnego wagonu w skali oraz model torowiska, po którym wagon przemieszcza się za pomocą wózka o napędzie elektrycznym.



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do badania odpowiedzi dynamicznej modelu wagonu towarowego

Utworzono model CAD stanowiska laboratoryjnego oraz przeprowadzono analizę modalną i wytypowano punkty pomiarowe, w których zamocowano akcelerometry oraz folie piezoelektryczne. Na Rys. 3 przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych na modelu ustroju nośnego wagonu towarowego.



Rys. 3. Model CAD stanowiska z oznaczonymi punktami pomiarowymi

W trakcie pomiarów odpowiedzi dynamicznej układu za pomocą akcelerometrów badany model wagonu podwieszono w celu odseparowania od torowiska. W celu wzbudzenia drgań zastosowano wahadło. Stanowisko pokazano na Rys. 4. Użyto akcelerometru PCB 352C68 oraz wzmacniacza pomiarowego MGCplus firmy HBM wraz z kartą pomiarową AP18i oraz oprogramowaniem CatmanEasy [34]. Pomiaru powtarzano pięciokrotnie w przypadku każdego z punktów pomiarowych.



Rys. 4. Model wagonu (system półokreślony) wraz z wahadłem

Podczas badania odpowiedzi dynamicznej modelu w trakcie przejazdu w roli czujnika zastosowano folię piezoelektryczną MFC. Na Rys. 5 pokazano folię piezoelektryczną MFC naklejoną na powierzchni elementu modelu wagonu towarowego. Przetworniki piezoelektryczne Macro Fiber Composite zbudowane są z prostokątnych prętów ceramicznych umieszczonych pomiędzy warstwami kleju, elektrodami i folią poliamidową. Dostarczane są w postaci gotowych do użycia przetworników, które mogą być naklejane na

powierzchni elementów lub osadzone w strukturze kompozytowej. Przetworniki są trwałe, wydajne i odporne na uszkodzenia. Mogą być z powodzeniem stosowane w roli wzbudników lub tłumików drgań mechanicznych, jak i czujników [24, 35].



Rys. 5. Przetwornik MFC M8514-P1 naklejony na badany model

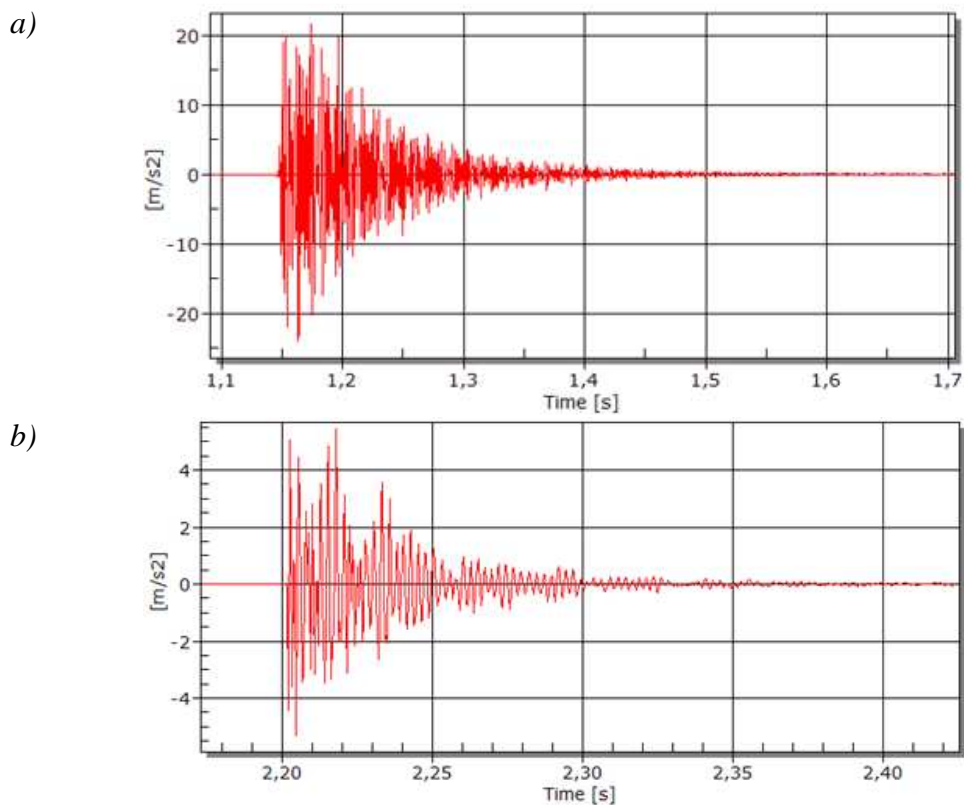
W celu akwizycji danych pomiarowych zastosowano kartę pomiarową NI-9215 firmy National Instruments, której zakres pomiarowy wynosi  $\pm 10$  V przy 16 bitowej rozdzielczości pomiaru, zaś częstotliwość próbkowania każdego z czterech kanałów to 100kS/s. Kartę zamontowano w module pomiarowym NI cDAQ-9191 umożliwiającym przesyłanie danych pomiarowych bezprzewodowo w pomieszczeniach zamkniętych w zasięgu 30 metrów, zaś w przestrzeni otwartej do odległości 100 metrów. Układ pomiarowy zasilano z akumulatora żelowego. Taka konfiguracja toru pomiarowego umożliwiła przeprowadzenie pomiarów w trakcie przejazdu modelu wagonu towarowego po utworzonym torowisku. Akwizycji danych pomiarowych i ich opracowania dokonano w środowisku LabVIEW.

#### 4. Otrzymane wyniki

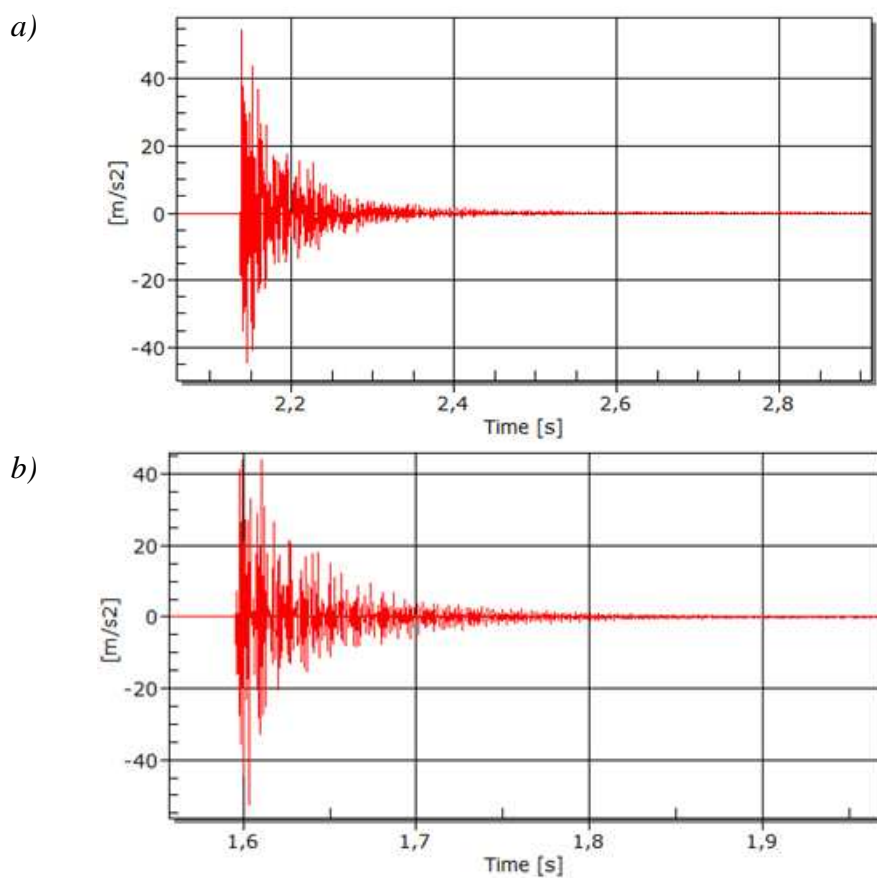
W pierwszym etapie pracy przeprowadzono badania odpowiedzi dynamicznej modelu wagonu towarowego przy wymuszeniu za pomocą wahadła. Pomiary prowadzono z użyciem akcelerometru, kolejno w pięciu punktach pomiarowych modelu oznaczonych na Rys. 3. Badania przeprowadzono bez obciążenia modelu wagonu, jak i z obciążeniem ładunkiem o masie 20 kg. Celem takiego działania było określenie możliwości wnioskowania na temat stanu badanego obiektu na podstawie zmierzonej odpowiedzi na zadane wymuszenie oraz identyfikacja punktów pomiarowych, w których takie wnioskowanie jest możliwe. Na Rys. 6 i 7 przedstawiono otrzymane przebiegi odpowiedzi dynamicznej układu w przypadku wybranych punktów pomiarowych.

W punkcie pomiarowym P3 wyraźnie widoczna jest zmiana przebiegu zmierzonego sygnału po obciążeniu modelu ładunkiem. Maksymalna wartość przyspieszenia drgań zmierzona bez obciążenia wynosiła ponad  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , zaś po obciążeniu spadła do około  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Czas niezbędny do całkowitego wytlumienia wzbudzonych drgań zmniejszył się z 0,55 s do 0,2 s. W punkcie pomiarowym mierzone były parametry drgań układu w kierunku pionowym, a więc prostopadłe do kierunku wymuszenia układu.

W punkcie pomiarowym P5 nie zaobserwowano wyraźnej zmiany zarejestrowanej odpowiedzi układu na wymuszenie. Maksymalna amplituda przyspieszenia drgań w obu przypadkach osiągnęła wartość ponad  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , zaś czas wytlumienia drgań układu zmniejszył się z 0,5 s do 0,4 s. W przypadku punktu pomiarowego P5 mierzono parametry drgań układu w kierunku zgodnym z kierunkiem wymuszenia.



Rys. 6. Przebieg odpowiedzi układu na wymuszenie w punkcie pomiarowym P3 bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b)



Rys. 7. Przebieg odpowiedzi układu na wymuszenie w punkcie pomiarowym P5 bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b)



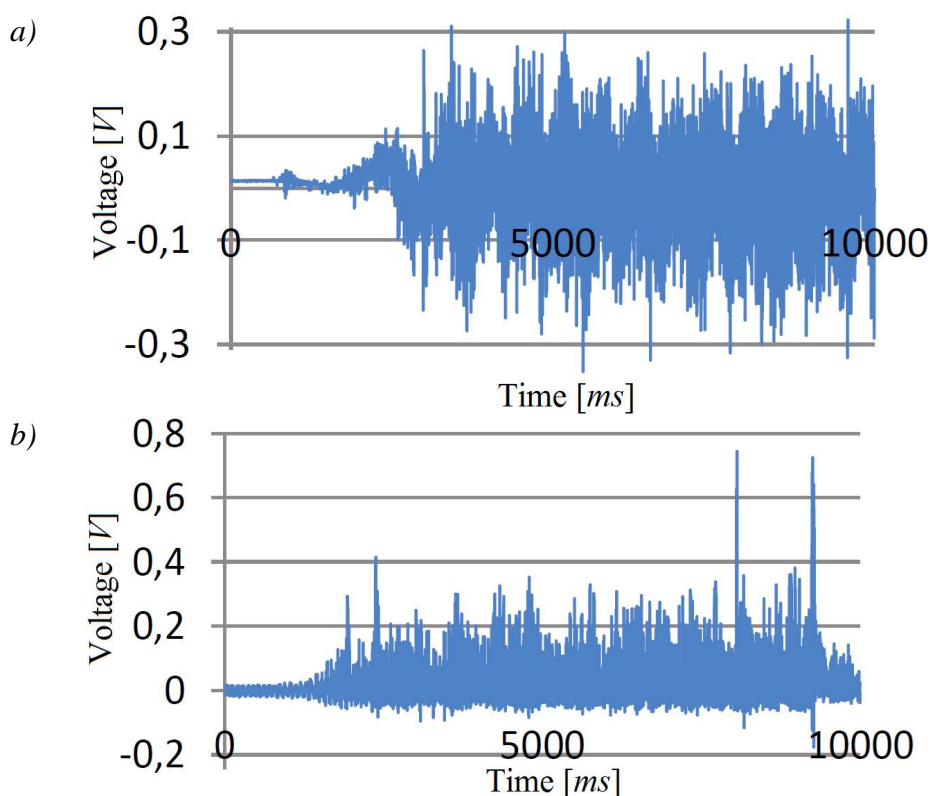
Tab.1. Porównanie wyników pomiarów drgań

Punkt pomiarowy	Bez obciążenia		Z obciążeniem	
	$a [m/s^2]$	$t [s]$	$a [m/s^2]$	$t [s]$
P1	40	0,55	40	0,35
P2	14	1	8	0,4
P3	23	0,55	6	0,2
P4	25	0,8	15	0,4
P5	55	0,5	50	0,4

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w przypadku wszystkich punktów pomiarowych. Wyraźnie widoczna jest zmiana przebiegu zmierzonego sygnału po obciążeniu w przypadku punktów, w których pomiary prowadzono w kierunku prostopadłym do wymuszenia (punkty P2, P3 i P4). W pozostałych przypadkach nie zaobserwowano większych zmian rejestrowanych przebiegów.

W trakcie dalszych badań model wagonu towarowego poruszał się po torowisku z ustaloną prędkością, zaś rejestracji jego odpowiedzi dynamicznej dokonywano z użyciem folii piezoelektrycznej typu MFC, naklejonej w miejscu punktu pomiarowego P2. Rejestrowano sygnały napięcia prądu elektrycznego, generowane przez folię piezoelektryczną w wyniku jej odkształcenia spowodowanego drganiami układu. W celu umożliwienia swobodnego przejazdu modelu, zastosowano bezprzewodową transmisję danych pomiarowych. Pomiary prowadzono w przypadku modelu poruszającego się bez obciążenia, jak i z ładunkiem o masie 20 kg. Każdy z przejazdów powtarzano dziesięciokrotnie w celu weryfikacji powtarzalności rezultatów.

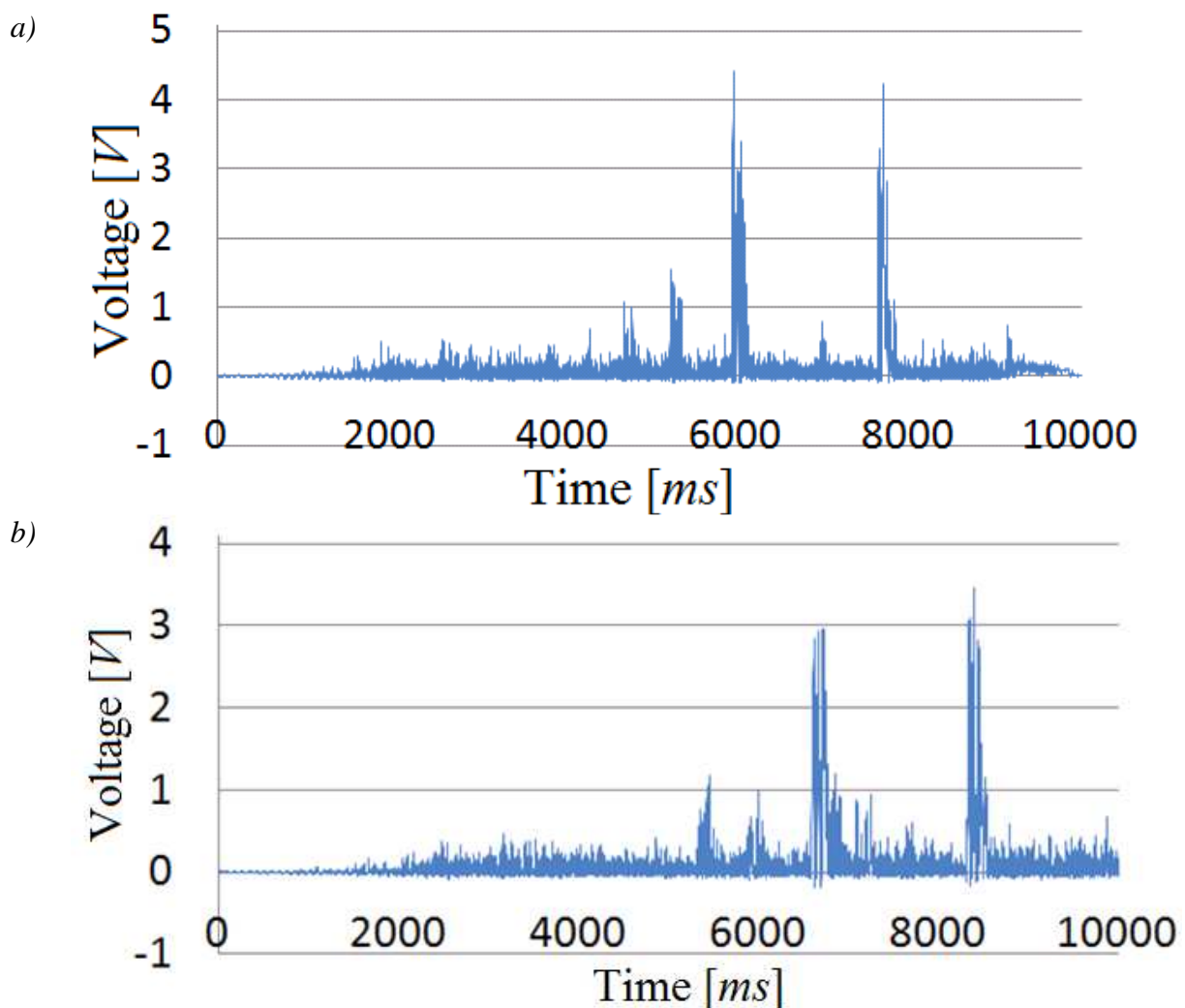
Na Rys. 8 przedstawiono przebiegi napięcia prądu elektrycznego, generowanego przez folię piezoelektryczną typu MFC w trakcie przejazdu modelu wagonu bez obciążenia i z obciążeniem, w przypadku gdy na torowisku nie umieszczono żadnej przeszkody.



Rys. 8. Przebieg sygnału generowanego przez folię MFC w trakcie przejazdu bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b), bez przeszkody na torowisku

Można zaobserwować wyraźną zmianę zarejestrowanego sygnału napięciowego w przypadku przejazdu modelu wagonu z obciążeniem. Generowane przez folię piezoelektryczną napięcie ma przebieg niesymetryczny, widoczny jest także wzrost wartości maksymalnych generowanego napięcia prądu elektrycznego.

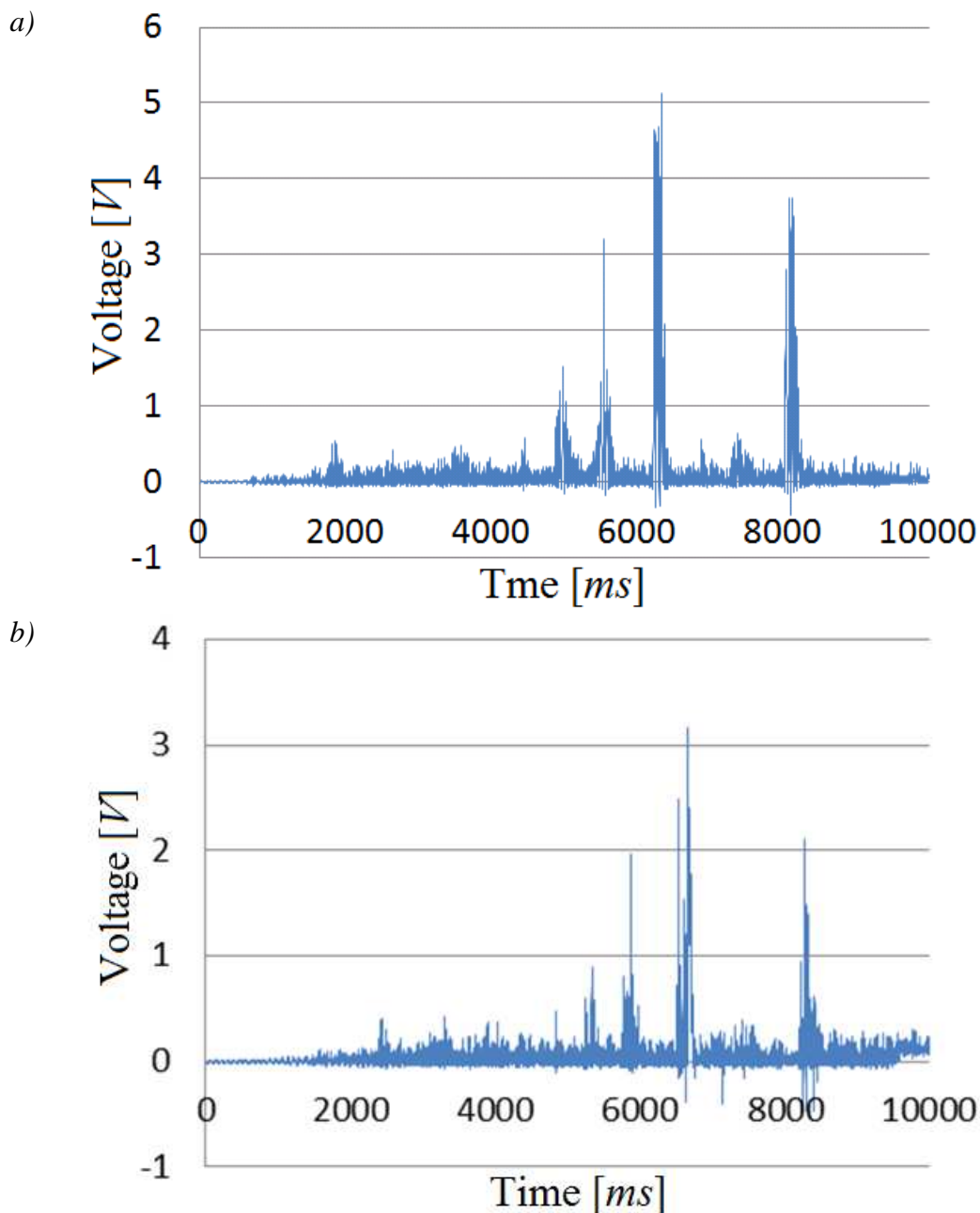
W trakcie dalszych badań na torowisku umieszczano przeszkodę w postaci stalowego elementu mocowanego do jednej lub obu szyn o długości 25 mm i grubości 2 mm. W przypadku montażu przeszkód na obu torach, umieszczono je w tej samej odległości od początku torowiska. W celu weryfikacji powtarzalności pomiarów, prowadzono je dziesięciokrotnie, w sytuacjach gdy przeszkoda znajdowała się na szynie lewej, prawej lub na obu szynach. Na Rys. 9 do 11 zamieszczono przebiegi zarejestrowanego sygnału napięciowego, generowanego przez folię piezoelektryczną MFC, naklejoną na model wagonu towarowego w miejscu punktu pomiarowego P2. Przebiegi rejestrowano bezprzewodowo z użyciem modułu pomiarowego NI cDAQ-9191 oraz karty pomiarowej NI 9215.



Rys. 9. Przebieg napięcia generowanego przez folię MFC w trakcie przejazdu bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b), z przeszkodą na szynie lewej

Analizując otrzymane przebiegi przejazdu modelu przez przeszkodę zamocowaną na lewej szynie, w obu przypadkach (z obciążeniem, jak i bez obciążenia) można zauważyć wyraźny wzrost napięcia generowanego przez folię piezoelektryczną w trakcie pokonywania przeszkody przez obie osie wagonu. Widoczny jest także wzrost napięcia prądu elektrycznego generowanego w chwili pokonywania przeszkody przez wózek napędowy układu. Wartości

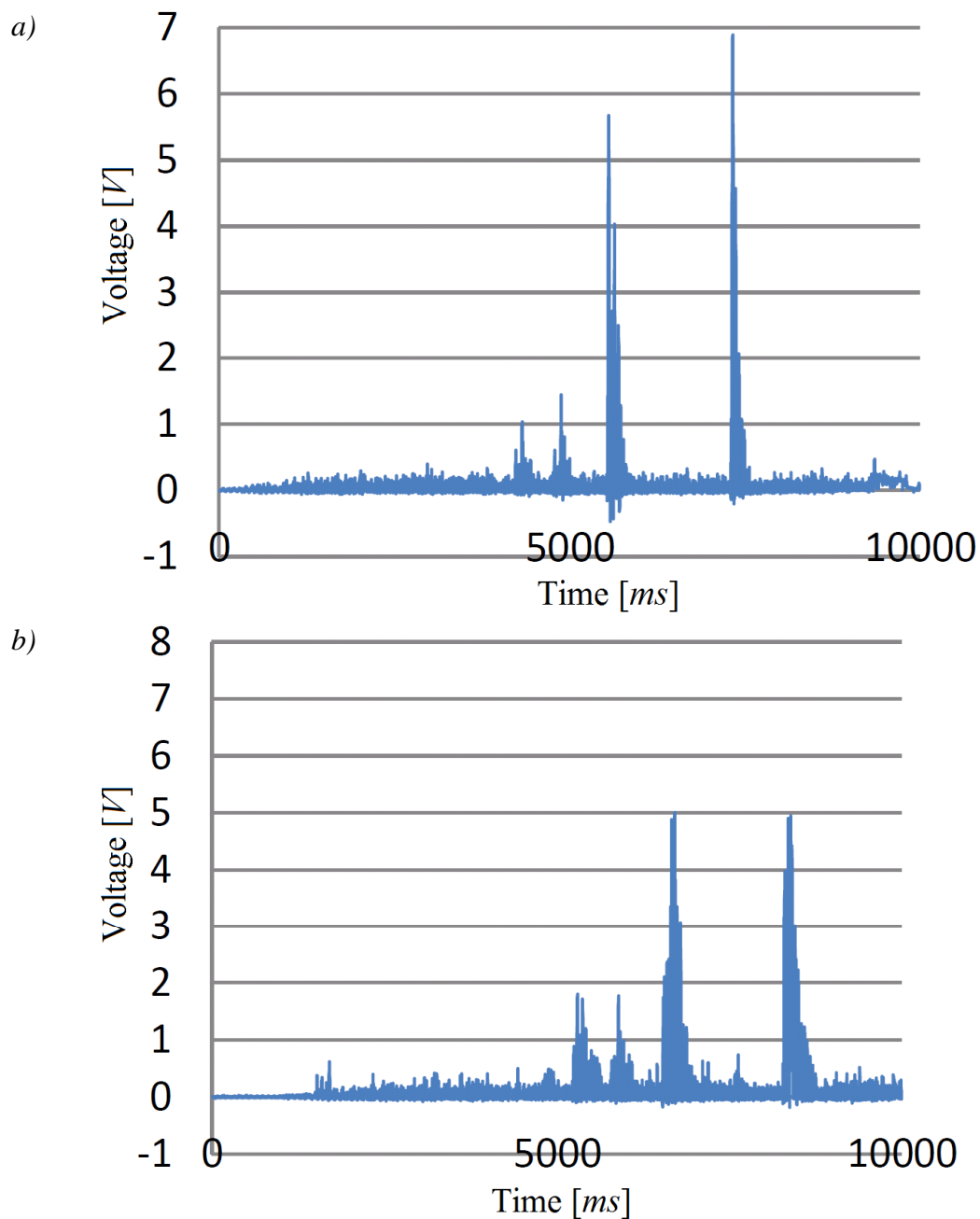
szczytowe napięcia w tym przypadku nie mają jednak dużej wartości i mogą być interpretowane niejednoznacznie, ze względu na poziom sygnału generowanego w trakcie całego przejazdu. W przypadku przejazdu modelu z ładunkiem widoczny jest nieznaczny spadek wartości maksymalnych generowanego napięcia prądu elektrycznego.



Rys. 10. Przebieg napięcia generowanego przez folię MFC w trakcie przejazdu bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b), z przeszkodą na szynie prawej

Po umieszczeniu przeszkody na szynie prawej, zaobserwowano wzrost wartości napięcia generowanego przez folię piezoelektryczną w trakcie przejazdu wózka napędowego przez przeszkodę. W tym przypadku przeszkoda umieszczona jest z tej samej strony modelu, z której naklejono folię piezoelektryczną. Sygnały generowane przez folię w trakcie przejazdu mogą być jednoznacznie interpretowane. W trakcie przejazdu z ładunkiem również zaobserwowano spadek maksymalnych wartości rejestrowanego sygnału, względem przejazdów modelu bez obciążenia.

Ostatnim etapem badań był przejazd modelu po torowisku z przeszkodami umieszczonymi na obu szynach. Zarejestrowane przebiegi napięcia prądu elektrycznego generowanego przez folię piezoelektryczną zamieszczono na Rys. 11.



Rys. 11. Przebieg napięcia generowanego przez folię MFC w trakcie przejazdu bez obciążenia (a) oraz z obciążeniem (b), z przeszkodą na obu szynach

W przypadku rozmieszczenia przeszkód na obu szynach torowiska widoczny jest wyraźny wzrost wartości maksymalnych generowanych sygnałów. Istnieje możliwość jednoznacznej interpretacji sygnałów generowanych przez folię piezoelektryczną, zarówno w trakcie przejazdu modelu wagonu, jak i wózka napędowego przez przeszkody. Jednocześnie, jak we wcześniejszych pomiarach, obserwuje się spadek wartości maksymalnych sygnału w przypadku przejazdu z obciążeniem, względem modelu nieobciążonego.

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono sprawozdanie z przeprowadzonych badań odpowiedzi dynamicznej na wymuszenia modelu wagonu towarowego typu 1415-A3. Model badano w warunkach odseparowania od szyn torowiska oraz w trakcie jazdy. Pomiarów dokonano stosując akcelerometry oraz folie piezoelektryczne typu MFC. Układ wzbudzany był do drgań za pomocą wahadła w przypadku modelu półokreślonego lub poprzez przeszkody umieszczone na torowisku. Badano możliwość wnioskowania o stanie obiektu na podstawie analizy otrzymanych sygnałów. Prowadzone prace są wstępem do utworzenia systemu nieinwazyjnej techniki badania stanu technicznego wagonów towarowych w trakcie ich eksploatacji. Działanie systemu będzie oparte o analizę odpowiedzi dynamicznej obiektu, mierzonej za pomocą folii piezoelektrycznych, naklejonych na wytypowanych elementach badanego obiektu. Przedstawione prace miały na celu weryfikację możliwości wnioskowania o stanie badanego obiektu na podstawie pomiaru jego odpowiedzi na wymuszenia dynamiczne i możliwości jej odseparowania od szumu, będącego efektem jego pracy w normalnych warunkach eksploatacji. Wykazano, że podobnie jak w przypadku systemów pomiaru drgań wymuszonych przez przejazd składu kolejowego, w których czujniki montowane są na elementach infrastruktury kolejowej lub w otaczających ją budynkach [29, 30], istnieje możliwość wnioskowania o stanie technicznym badanego obiektu na podstawie sygnałów generowanych przez odpowiednio rozmieszczone czujniki piezoelektryczne.

W ramach badań wytypowano punkty pomiarowe na utworzonym modelu wagonu towarowego oraz przeprowadzono serię badań. Wykazano, że w przypadku zastosowania do pomiaru odpowiedzi dynamicznej układu akcelerometrów, zmiany stanu wyraźnie widoczne są jedynie w przypadku pomiaru parametrów drgań w kierunku innym niż kierunek wymuszenia. Taki pomiar byłby niemożliwy w przypadku obiektu rzeczywistego wzbudzanego do drgań przez siły oddziaływujące w trakcie normalnej eksploatacji. W takim przypadku skuteczne może się okazać zastosowanie folii piezoelektrycznych naklejanych na powierzchni wskazanych elementów badanego obiektu, które w projektowanym systemie będą pełniły funkcję sensorów. Wstępne badania, przeprowadzone na utworzonym stanowisku laboratoryjnym wykazały skuteczność proponowanej metody. Istnieje możliwość analizowania i interpretowania sygnału napięcia prądu elektrycznego, generowanego przez folię piezoelektryczną naklejoną na powierzchni badanego obiektu, w celu wnioskowania o jego stanie. W trakcie wszystkich przeprowadzonych badań obserwowano spadek wartości napięcia generowanego przez układ po jego obciążeniu, co jest wynikiem jego większej sztywności. Możliwe jest także jednoznaczne identyfikowanie sygnałów generowanych w trakcie przejazdu przez przeszkodę, zarówno samego modelu wagonu towarowego, jak i wózka napędowego.

W ramach dalszych prac przeprowadzone zostaną badania na obiektach rzeczywistych – węglarkach typu 1415-A3. Na podstawie przeprowadzonej analizy modalnej utworzonego modelu CAD rozpatrywanego wagonu towarowego, wytypowane zostaną punkty pomiarowe, w których naklei się folie piezoelektryczne będące sensorami w projektowanym systemie.

Pracę zrealizowano w ramach projektu nr PBS2/A6/17/2013, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2013- 2016.

## Literatura

1. Baier A. et al: Experimental synthesis and analysis of geometric and structural properties of chosen elements of railway wagons, Silesian University of Technology Publishing House, 2012, Gliwice.
2. Baier A, Zolkiewski S.: Initial research of epoxy and polyester warp laminates testing on abrasive wear used in car sheathing, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (1): 37–43.
3. Biały K.: Mechanical and electrical elements in reduction of vibrations. *Journal of Vibroengineering* 2012; 14(1): 123-128.
4. Bruni S., Vinolas J., Berg M., Polach O., Stichel S.: Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics* 2011; 49 (7): 1021-1072.
5. Buchacz A., Płaczek M.: The analysis of a composite beam with piezoelectric actuator based on the approximate method. *Journal of Vibroengineering* 2012; 14 (1): 111-116.
6. Buchacz A., Galeziowski D.: Synthesis as a designing of mechatronic vibrating mixed systems. *Journal of Vibroengineering* 2012; 14 (2): 553 -559.
7. Buchacz A., Płaczek M., Wróbel A.: Control of characteristics of mechatronic systems using piezoelectric materials. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2013; 51: 225-234.
8. Buchacz A., Płaczek M., Wróbel A.: Modelling and analysis of systems with cylindrical piezoelectric transducers. *Mechanika*, 2014; 20(1): 87-91.
9. Buchacz A, Płaczek M, Wróbel A.: Modelling of passive vibration damping using piezoelectric transducers – the mathematical model. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (2): 301–306.
10. Chłus K., Krasoń W.: Symulacja oddziaływania obciążenia statycznego i dynamicznego na wytrzymałość platform kolejowej. Artykuł Autorski z X Forum Inżynierskiego ProCAX, Sosnowiec/Siewierz. 6-9 października 2011.
11. Connolly D. P., Kouroussis G., Giannopoulos A., Verlinden O., Woodward P. K., Forde M. C.: Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2014; 58: 37-47.
12. Dymarek A., Dzitkowski T.: Modelling and synthesis of discrete – continuous subsystems of machines with damping. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; Vol. 164-165: 1317-1326.
13. Dymarek A., Dzitkowski T.: Searching for the values of damping elements with required frequency spectrum. *Acta Mechanica et Automatica* 2010; 4: 19-22.

14. Grebowski K., Zielińska M.: Modelowanie oddziaływań dynamicznych pociągu typu Pendolino na konstrukcje zabytkowych mostów kolejowych w Polsce. *Przegląd Budowlany* 2015; 1: 27-32.
15. Hecht M.: Wear and energy-saving freight bogie designs with rubber primary springs: principles and experiences. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2009; 223 (2): 105-110.
16. Herwig A., Bruhwiler E.: In-situ dynamic behaviour of a railway bridge girder under fatigue causing traffic loading. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP11, Zurich, Switzerland, 1-4 August 2011*: 389-395.
17. Iacob-Mare C., Manescu T. S.: Study of the freight wagon body through the method of finite elements. *Metalurgia* 2013; 65 (7): 13.
18. Jamroziak K., Kosobudzki M.: Determining the torsional natural frequency of underframe of off-road vehicle with use of the procedure of operational modal analysis. *Journal of Vibroengineering*, 2012; 14 (2): 472-476.
19. Jamroziak K., Kosobudzki M., Ptak J.: Assessment of the comfort of passenger transport in special purpose vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013,15 (1): 25-30.
20. Jönsson P. A., Stichel S., Persson I.: New simulation model for freight wagons with UIC link suspension, *Vehicle System Dynamics* 2008; 46: 695-704.
21. Klarecki K., Hetmańczyk M., Rabsztyń D.: Influence of the selected settings of the controller on the behavior of the hydraulic servo drive. *Mechatronics - Ideas for Industrial Application. Advances in Intelligent Systems and Computing* 2015; 317: 91-100.
22. Kovalev R., Lysikov N., Mikheev G. et al: Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. *Multibody System Dynamics* 2009; 22 (4): 399-423.
23. Mehrpouya M., Ahmadian H.: Estimation of applied forces on railway vehicle wheelsets from measured vehicle responses. *International Journal of Vehicle Structures and Systems* 2009; 1(4): 104-110.
24. Okabe Y., Nakayama F.: Damage Detection in CFRP Laminates by Ultrasonic Wave Propagation Using MFC Actuator and FBG Sensor. *Transactions of Space Technology Japan* 2009; 7 (26): 7-12.
25. Oleszak P., Cieśla J., Szaniec W.: Badanie skutków oddziaływań bocznych na wiadukcie kolejowym leżącym na łuku. *Budownictwo i Architektura* 2013; 12(2): 47-54.
26. Płaczek M.: Dynamic characteristics of a piezoelectric transducer with structural damping, *Solid State Phenomena, Mechatronic Systems and Materials IV* 2013; 198: 633-638.

27. Płaczek M.: Modelling and investigation of a piezo composite actuator application, *Int. J. Materials and Product Technology* 2015; 50 (3/4): 244-258.
28. Salamak M., Łaziński P., Pradelok S., Bętkowski P.: Badania odbiorcze mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym – wymagania i praktyka. Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym. *INFRASZYN 2014, Zakopane, 9-11 kwietnia 2014*: 218-227,
29. Sekuła K., Kołakowski P., Świercz A.: System monitorowania obciążeń oraz stanu technicznego kratownicowych mostów w kolejnictwie. *Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena Jej Żywotności, Seminarium MONIT, Warszawa, 19 listopada 2010*: 1-4.
30. Stypuła K.: Wybrane problemy ochrony zabudowy powierzchniowej przed drganiami generowanymi przez komunikację podziemną. *Górnictwo i Geoinżynieria* 2009; 3(1): 351- 362.
31. Wróbel A.: Kelvin Voigt's model of single piezoelectric plate. *Journal of Vibroengineering* 2012; 14 (2): 534-537.
32. Wróbel A., Płaczek M., Buchacz A., Majzner M.: Study of mechanical properties and computer simulation of composite materials reinforced by metal, *Int. J. Materials and Product Technology* 2015; 50 (3/4): 259-275.
33. Zolkiewski, S.: Damped Vibrations Problem Of Beams Fixed On The Rotational Disk. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 2011; 21 (1): 3033-3041.
34. <http://www.hbm.com/>
35. <http://www.smart-material.com/>