

Witold LUTY<sup>1</sup>  
Marcin MIETEN<sup>2</sup>

# ANALIZA OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH ELEMENTÓW UKŁADU JEZDNEGO POJAZDU OSOBOWO-TERENOWEGO PODCZAS JAZDY W WARUNKACH TERENOWYCH

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych pojazdu osobowo-terenowego podczas jazdy po drogach poligonowych. Podczas badań mierzono przyspieszenia oraz ugięcie zawieszenia przedniej osi jezdnej, a także przyspieszenia ramy nadwozia. Na podstawie wykonanych badań wyznaczono wskaźniki porównawcze oraz charakterystyki określające poziom oraz strukturę częstotliwościową obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego powstałych w wyniku zmiany wysokości profilu podłoża gruntowego. Wyniki te posłużyły do oceny oddziaływania podłoża na pojazd.

## Wstęp

W badaniach przebiegowych pojazdów ocenia się odporność ich struktury nośnej oraz elementów zabudowy i wyposażenia na udary wywołane jazdą po nierównościach drogi. Zasadniczą część testów wykonuje się w warunkach jazdy po podłożach gruntowych. Podczas jazdy w warunkach terenowych układ jezdny pojazdu jest narażony na zmienne obciążenia dynamiczne spowodowane znacznymi zmianami wysokości profilu podłoża. Poziom obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu zależy od amplitudy nierówności podłoża oraz prędkości jazdy. Wiadomo, że amplitudy zmian profilu podłoża gruntowego mogą osiągać znaczne wartości. Jednak znaczna długość nierówności podłoża gruntowych oraz ich podatność na odkształcenie pod wpływem nacisku kół jezdnych pojazdu sprawiają, że częstotliwość wymuszeń kinematycznych działających na koła jezdne pojazdu jest najczęściej niewielka. Istnieje problem doboru warunków badań przebiegowych realizowanych na

---

<sup>1</sup> dr inż. Witold Luty, Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej w Sulejówku.

<sup>2</sup> mgr inż. Marcin Mieten, Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej w Sulejówku.

podłożach gruntowych. U jego podstaw leży brak charakterystyk zmian profilu różnego rodzaju dróg gruntowych i bezdroży. Konieczna jest parametryzacja podłoży gruntowych w celu uzyskania charakterystyk i wskaźników porównawczych, które można wykorzystać w procesie planowania warunków badań przebiegowych pojazdów. Podjęto pracę badawczą, która ma ocenić oddziaływania różnych rodzajów podłoży gruntowych na poziom i strukturę częstotliwościową obciążeń dynamicznych pojazdu. Wyniki pracy prowadzą do ustalenia powiązania geometrycznego opisu profilu drogi z poziomem i strukturą częstotliwościową obciążeń dynamicznych struktury nośnej pojazdu. Wyniki pracy są wstępem do parametryzacji warunków badań pojazdów w procesie badań przebiegowych.

W literaturze najczęściej opisuje się profil podłoża za pomocą wartości skutecznych zmian wysokości profilu drogi *RMS* [1, 2, 4, 8, 12]. Stosowane są również inne miary np. wskaźnik *IRI* (*International Roughness Index*) [14]. Jednak używany jest głównie do opisu stanu nierówności podłoży utwardzonych w procesie charakterystyki profilu dróg publicznych.

Zmiany profilu podłoża można również charakteryzować w sposób pośredni na podstawie wskaźników i charakterystyk obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu podczas jazdy z ustaloną prędkością. Poziom doraźnych obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu wywołanych oddziaływaniem podłoża opisuje się najczęściej poprzez wartości szczytowe amplitud ich przyspieszenia pionowego [3, 6, 9, 13]. Stosowane są również miary ilościowe określające poziom energii drgań elementów pojazdu, np. wartość skuteczna zmian przyspieszeń pionowych (*RMS*) [5, 7, 10, 11]. Ważnym narzędziem porównawczym poziomu oraz struktury częstotliwościowej drgań elementów pojazdu wywołanych oddziaływaniem podłoża podczas jazdy jest gęstość widmowa mocy (*PSD*) przyspieszeń pionowych [5, 7, 10, 11].

Wyznaczenie powszechnie stosowanych wskaźników porównawczych lub charakterystyk wymaga zastosowania narzędzi matematycznych, które mogą być przygotowane na bazie oprogramowania własnego lub gotowego programu komputerowego.




## Badania eksperymentalne

Obiektem badań były różne rodzaje podłoża gruntowego dostępne na poligonie badawczym WITPiS w Sulejówku. Poszczególne odcinki dobrano jako reprezentatywne dla dróg poligonowych WITPiS. Różnią się one pod względem wartości skutecznej *RMS* przebiegu zmian wysokości ich profilu a także stanem pokrycia glebowego. Oznaczenie oraz charakterystykę poszczególnych odcinków podłoża przedstawiono w tabeli 1.

Wartości *RMS* zmian wysokości poszczególnych rodzajów podłoża zostały wyznaczone na podstawie pomiarów bezpośrednich wykonanych w koleinach powstających po kołach przejeżdżającego pojazdu. Są więc trudne do odtworzenia w każdym

przejeździe. Nie można liczyć na ich powtarzalność, tak jak w przypadku dróg utwardzonych. Jednak charakterystyki podłoża gruntowych mogą być powtarzalne na odpowiednio długim odcinku przejechanej drogi.

**Tabela 1.** Oznaczenie oraz dane charakterystyczne odcinków badawczych

Oznaczenie typu podłoża	Charakterystyczne cechy
<p>S1 – bezdroże</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nawierzchnia gruntowa piaszczysta, ubita</li> <li>– <i>RMS</i> profilu na reprezentatywnym odcinku podłoża 0,04 m</li> <li>– brak albo płytkie bruzdowanie przez koła jezdne pojazdu</li> <li>– nierówności o znacznej długości przewyższającej rozstaw osi pojazdu</li> </ul>
<p>S2 – droga czołgowa łagodna</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nawierzchnia gruntowa piaszczysta, luźna</li> <li>– <i>RMS</i> profilu na reprezentatywnym odcinku podłoża 0,05 m</li> <li>– możliwe bruzdowanie przez koła jezdne pojazdu</li> <li>– nierówności o długości przewyższającej rozstaw osi pojazdu</li> </ul>
<p>S3 – droga czołgowa ciężka</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nawierzchnia gruntowa piaszczysta, luźna</li> <li>– <i>RMS</i> profilu na reprezentatywnym odcinku podłoża 0,09 m</li> <li>– głębokie bruzdowanie przez koła jezdne pojazdu</li> <li>– nierówności o długości przewyższającej rozstaw osi pojazdu</li> </ul>

Z pomiarów bezpośrednich wynika, że podłoże oznaczone jako S3 ma najwyższe wartości zmian amplitudy profilu. Podłoża S1 i S2 charakteryzują się znacznie niższymi wartościami skutecznymi zmian profilu podłoża. Zatem na podłożu S3 można spodziewać się najwyższego poziomu obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu.

Do badań wykorzystano pojazd Honker 2000 w wersji Hard-Top (rys. 1). Jest to samochód osobowo-terenowy o klasycznym układzie konstrukcyjnym. Jest wyposażony w zawieszenie zależne składające się z podłużnych resorów piórowych konwencjonalnych oraz hydraulicznych amortyzatorów podwójnego działania. Podstawowe parametry techniczne pojazdu zostały przedstawione w tabeli 2.



Rys. 1. Widok pojazdu Honker 2000 podczas badań

Tabela 2. Podstawowe parametry techniczne samochodu Honker 2000

<i>Parametr</i>	<i>Wartość</i>
Masa własna pojazdu [kg]	2350
Ładowność [kg]	1150
DMC [kg]	3500
Długość [mm]	4660
Szerokość [mm]	1870
Wysokość [mm]	2190
Rozstaw osi [mm]	2827
Rozmiar kół	16

Badany pojazd był tylko narzędziem umożliwiającym ocenę oddziaływania podłoża gruntowego na poziom i strukturę jego obciążeń dynamicznych. Testy przeprowadzono podczas jazdy z prędkością 10 km/h. Taką wartość prędkości ustalono podczas jazdy wstępnej na najtrudniejszym podłożu, czyli na drodze czołgowej o najwyższych wartościach amplitudy zmian wysokości profilu, oznaczonej jako S3 (tab. 1). Prędkość wyznaczono jako prędkość maksymalną, z którą można przejechać bez narażenia zdrowia kierowcy oraz bez narażenia pojazdu na uszkodzenie.

Podczas badań eksperymentalnych rejestrowano następujące wielkości fizyczne:

- przyspieszenie pionowe przedniej osi jezdnej pojazdu;
- przyspieszenia pionowe ramy pojazdu nad przednią osią jezdną;
- ugięcie zawieszenia przedniej osi jezdnej.

Wymienione wielkości fizyczne rejestrowano po lewej i prawej stronie badanego pojazdu, ale analizowano wyniki uzyskane tylko po lewej stronie. Badania eksperymentalne wymagały zastosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej. Wykorzystano następujące urządzenia (tab. 3):

- rejestrator cyfrowy Hioki MR8847;
- cztery czujniki przyspieszenia AIS 4320;
- dwa przetworniki przemieszczenia Peltron.

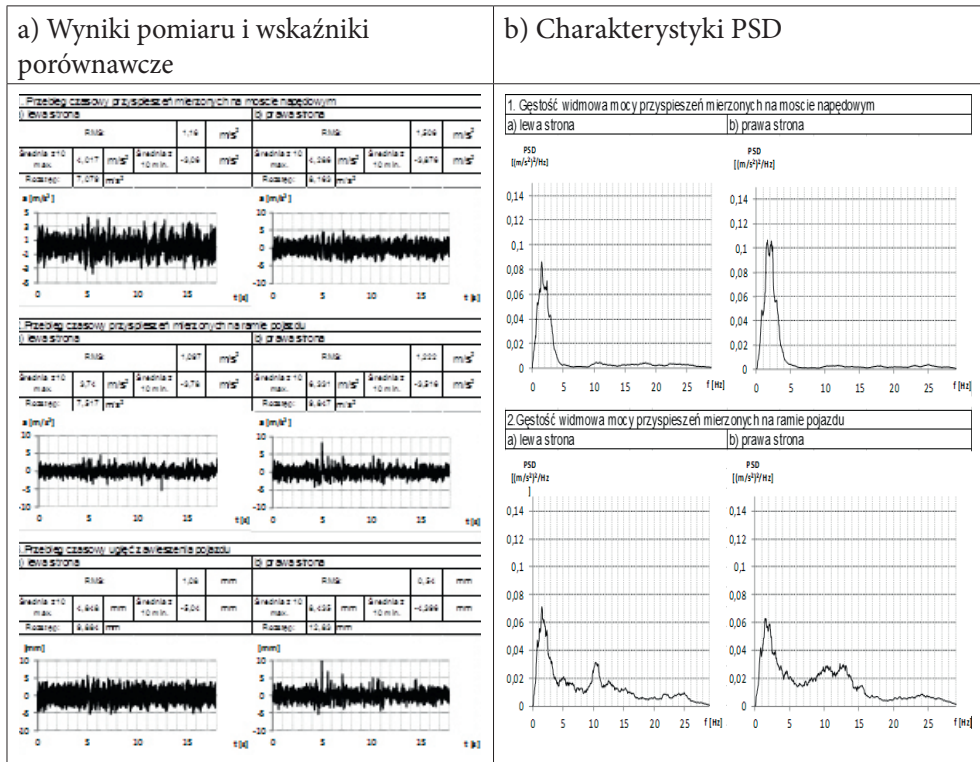
**Tabela 3.** Zestawienie wykorzystywanej aparatury

Nazwa	Widok
rejestrator pomiarowy Hioki MR8847	
czujnik przyspieszenia AIS 4320	
przetwornik przemieszczenia Peltron	

W ramach badań opracowano programy obliczeniowe przygotowane na bazie pakietów Matlab i Excel. Na podstawie wyników wyznaczono charakterystyki oraz wskaźniki porównawcze określające poziom oraz strukturę częstotliwościową obciążeń dynamicznych elementów układu zawieszenia pojazdu, w tym:

- średnią z 10 największych wartości przyśpieszenia  $a_{maks10}$  mierzonych na ramie oraz na osi jezdnej, jako miarę obciążeń doraźnych elementów układu jezdnego;
- średnią z 10 największych wartości ugięcia zawieszenia  $u_{maks10}$ , jako miarę obciążeń doraźnych elementów układu jezdnego;
- RMS przyśpieszenia mierzonych na ramie oraz na osi jezdnej, jako miarę obciążeń skutecznych elementów układu jezdnego;
- RMS ugięć zawieszenia, jako miarę obciążeń skutecznych elementów układu jezdnego;
- charakterystyki gęstości widmowej mocy  $PSD$  przyśpieszeń mierzonych na mocie napędowym;
- charakterystyki gęstości widmowej mocy  $PSD$  przyśpieszeń mierzonych na ramie.

Na podstawie każdego zestawu wyników pomiaru przygotowywany był arkusz z wynikami pomiarów bezpośrednich oraz z wynikami wykonywanych obliczeń. Przykład takiego arkusza przedstawiono na rysunku 2.

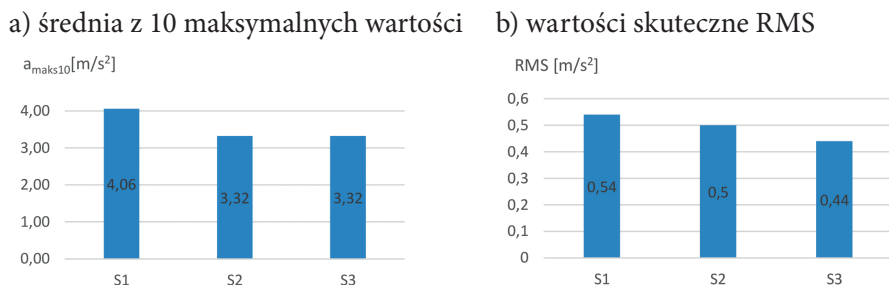


Rys. 2. Widok przykładowego arkusza w wynikami pomiaru i obliczeń uzyskanymi na podłożu S1

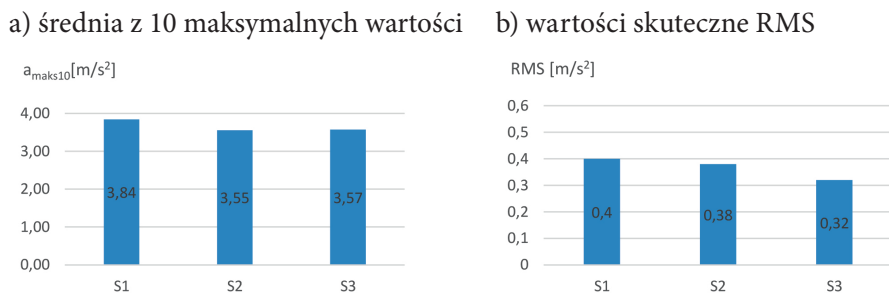
Wybrane wyniki pomiaru i obliczeń zestawione na podstawie każdej próby przejazdu stanowiły podstawę do wykonania analizy porównawczej oddziaływania poszczególnych rodzajów podłoża na poziom i strukturę częstotliwościową obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu.

## Analiza wyników pomiaru

Jazda z ustaloną prędkością po różnych typach podłoża gruntowego wywołała zmiany wartości wskaźników porównawczych poziomu obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu (rys. 3–5). W niektórych przypadkach, mimo mniejszych wartości skutecznych zmian profilu podłoża typu S1, osiągnięto wyższy poziom wartości wskaźnika średniej z 10 maksymalnych mierzonych przyspieszeń (rys. 3a, 4a), niż podczas jazdy po podłożach o wyższych wartościach skutecznych przebiegu zmian wysokości profilu (S2, S3). Ponadto jazda po podłożu S1 również spowodowała uzyskanie największych wartości średnich z 10 maksymalnych ugięć (rys. 5b) oraz przyspieszenia na moście napędowym oraz na ramie (rys. 3a, 4a) została osiągnięta na podłożu S1. Na rysunkach widać, że również na podłożu S2 osiągnięto porównywalne lub wyższe wartości wskaźników porównawczych obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu niż na podłożu S3 – podłożu o wyższej wartości *RMS* zmian profilu podłoża (rys. 3a, b, 4b, 5b).

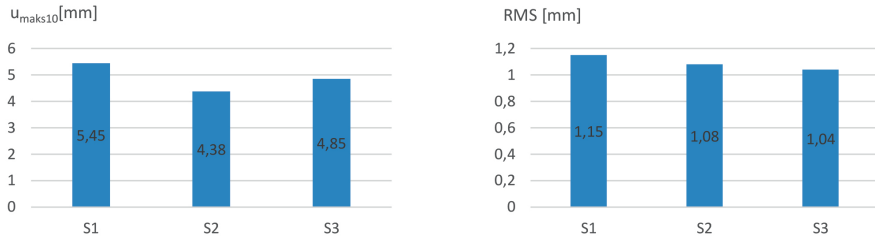


**Rys. 3.** Zestawienie wartości wskaźników porównawczych obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu – przyspieszenie mierzone na moście napędowym



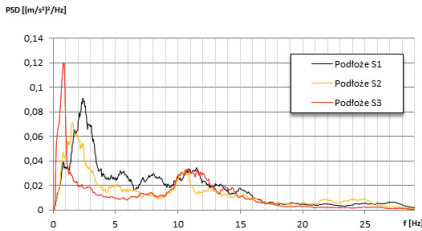
**Rys. 4.** Zestawienie wartości wskaźników porównawczych obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu – przyspieszenie mierzone na ramie

a) średnia z 10 maksymalnych wartości      b) wartości skuteczne RMS

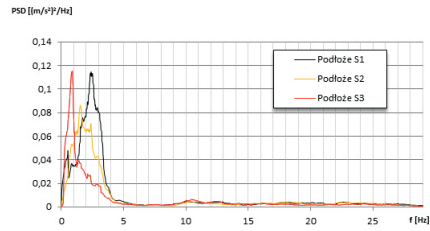


**Rys. 5.** Zestawienie wartości wskaźników porównawczych obciążeń dynamicznych elementów układu jezdnego pojazdu – ugięcie zawieszenia

Sformułowane spostrzeżenia znajdują odbicie w charakterystykach gęstości widmowej mocy *PSD* wyznaczonych na podstawie przebiegu zmian mierzonych wielkości fizycznych (rys. 6–7). Na przykładzie przedstawionych charakterystyk *PSD* można stwierdzić, że jazda po podłożu S1 o najniższych wartościach amplitudy zmian profilu podłoża skutkuje występowaniem mniejszych – w porównaniu z podłożem S3 oraz większych – w porównaniu z podłożem S2 wartości maksymalnych dominant przyspieszenia mierzonego na ramie i osi jezdnej pojazdu w zakresie niskich częstotliwości, poniżej 4 Hz. Widoczne są również porównywalne wartości dominant charakterystyk *PSD* przyspieszeń mierzonych na osi jezdnej oraz na ramie pojazdu w zakresie częstotliwości drgań własnych osi jezdnej (ok. 10,5 Hz).



**Rys. 6.** Zestawienie charakterystyk gęstości widmowej mocy przyspieszeń mierzonych na moście napędowym



**Rys. 7.** Zestawienie charakterystyk gęstości widmowej mocy przyspieszeń mierzonych na ramie pojazdu

Jednak widać wyraźnie, że piki wskazanych dominant charakterystyki *PSD* uzyskanej na podłożu S1 są znacznie szersze niż ich odpowiedniki uzyskane na pozostałych podłożach gruntowych. Jednocześnie widoczny jest obszar większych wartości charakterystyki *PSD* przyspieszeń mierzonych na osi jezdnej pojazdu uzyskanej na podłożu S1 w zakresie częstotliwości od około 4 do 9 Hz w porównaniu z charakterystykami *PSD* uzyskanymi na podłożach S2 i S3 (rys. 6). To znaczy, że energia drgań elementów układu jezdnego w zakresie wskazanych częstotliwości może być większa na podłożu S1 nawet jeśli wartości maksymalne dominant