

Grzegorz Boruta

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Wydział Nauk Technicznych, Katedra Mechatroniki i Edukacji Techniczno-Informatycznej
10-719 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 2
e-mail: g.boruta@uwm.edu.pl

**Grzegorz Dyga, Filip Polak, Grzegorz Trawiński,
Jerzy Walentynowicz**

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu
00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
e-mail: gdyga@wat.edu.pl; fpolak@wat.edu.pl; gtrawinski@wat.edu.pl;
jwalentynowicz@wat.edu.pl

**BADANIA WSTĘPNE DIAGNOZOWANIA
NIEOBCIĄŻONYCH PRZEKŁADNI GŁÓWNYCH
MOSTÓW NAPĘDOWYCH KTO ROSOMAK
NA PODSTAWIE ANALIZY DRGAŃ**

STRESZCZENIE

W artykule opisano przydatność hamownianego stanowiska badawczego do badania zjawisk wibroakustycznych towarzyszących pracy mostów napędowych KTO Rosomak. Podano sposób wykorzystania dostępnej aparatury pomiarowo-analitycznej. Przedstawiono widma amplitudowo-częstotliwościowe sygnałów drganiowych zarejestrowanych przez akcelerometr mocowany w różny sposób w kilku punktach pomiarowych na kadłubach badanych mostów napędowych. Sformułowano wnioski i zalecenia dotyczące dalszych badań.

Słowa kluczowe:

mosty napędowe, diagnostyka, sygnał wibracyjny.

WSTĘP

Badania KTO Rosomak uszkodzonych podczas misji w Afganistanie obejmowały między innymi ocenę stanu technicznego przekładni głównych mostów napędowych po uszkodzeniach bojowych. Podjęto próbę opracowania szybkiej i prostej metody oceny stanu technicznego przekładni mostów napędowych tego pojazdu z wykorzystaniem pomiarów drgań przekładni pracującej pod obciążeniem.

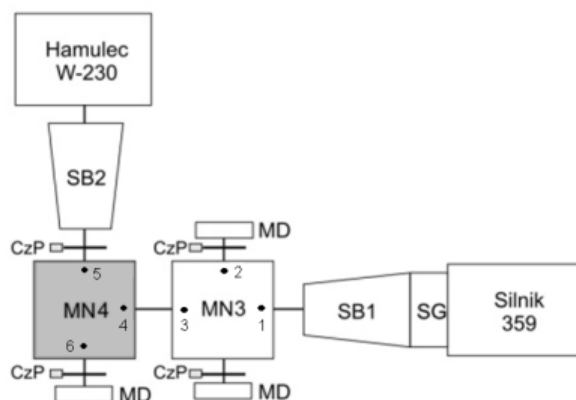
Diagnozowanie wibroakustyczne maszyn jest niezwykle proste do wykonania, gdy opracowana jest metoda takiego diagnozowania i znane są parametry w pełni sprawnych nowych przekładni. W rozpatrywanym przypadku przekładni głównych mostów napędowych KTO Rosomak podstawowym problemem jest znalezienie w redundantnych sygnałach, jakimi są sygnały akustyczne i drganiowe, składowych niosących informacje o stanie technicznym konkretnych par kinematycznych. Jest to szczególnie trudne dla maszyn o złożonej konstrukcji, pracujących w dynamicznie zmiennych stanach.

STANOWISKO BADAWCZE I WARUNKI BADAŃ

Stanowisko badawcze wykorzystane podczas badań zostało szczegółowo opisane w innym artykule oraz [5]. Badania wykonano dla przekładni głównych trzeciego (most przelotowy MN3) i czwartego (most tylny MN4) mostu KTO Rosomak na stanowisku w konfiguracji przedstawionej na rysunku 1.

Elementy przenoszenia napędu w badanych mostach były napędzane przez sześciocyndrowy czterosurowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym, który sam jest skomplikowanym źródłem sygnałów drganiowych [1, 3], poprzez sprzęgło, mechaniczną pięciobiegową skrzynię biegów, również będącą źródłem tych sygnałów, i wały napędowe. Wszystkie te zespoły nie są oryginalnym źródłem napędu badanych mostów napędowych w transporterze, a tylko elementami stanowiska badawczego. Stanowisko umożliwiało również obciążanie wału mostu przelotowego MN3 oraz półosi napędowych mostu napędowego MN4 za pomocą hamulca elektrowirowego. Podczas badań wibroakustycznych problemem może być nakładanie się sygnałów drganiowych z różnych urządzeń. Sygnały drganiowe

rejestrowane w określonym punkcie pomiarowym badanego urządzenia są silnie redundantne, bo są kompilacją sygnałów pochodzących od wszystkich źródeł drgań i dźwięku pracującego urządzenia [1, 4]. Nie był znany faktyczny stan techniczny badanych mostów napędowych pochodzących z pojazdu po uszkodzeniach bojowych. Założono, że stan techniczny badanych przekładni jest prawidłowy.



Rys. 1. Schemat konfiguracji stanowiska badawczego:
 SG — sprzęgło główne, SB — skrzynia biegów, MN — most napędowy,
 MD — masa dodatkowa (bezwładnik), CzP — czujnik prędkości obrotowej
 1–6 — punkty pomiaru sygnałów drganiowych

Źródło: opracowanie własne.

Pomiary sygnałów drganiowych (przebiegów wartości chwilowych przyspieszeń drgań w czasie) były wykonywane za pomocą miernika drgań Emerson CSI 2130 i akcelerometru A0760GP. Prezentowane badania były pierwszą próbą rejestracji sygnałów drganiowych z badanych przekładni i wstępnie wykonano pomiary bez obciążania elementów napędzanych przez silnik pracujący na biegu jałowym oraz z maksymalną prędkością obrotową wału korbowego (ustabilizowana praca silnika z jego regulatorem prędkości obrotowej) z włączonym jednym wybranym przełożeniem w skrzyni biegów.

Takie warunki pracy elementów napędzających zapewniły zmianę prędkości obrotowej elementów badanych przekładni bez zmiany przełożenia w skrzyni biegów, co powoduje zmianę kół zębatach przenoszących obciążenie i w konsekwencji zmianę generowanego sygnału wibroakustycznego generowanego przez

zespoły napędzające przekładni. Pomiary sygnałów drganiowych wykonano w trzech punktach pomiarowych dla każdego mostu napędowego, rejestrując sygnał drganiowy czujnikiem umieszczonym kolejno w jednym z sześciu punktów pomiarowych pokazanych na rysunku 1.

Badania wykonano akcelerometrem mocowanym do kadłubów badanych przekładni mostów napędowych trzema metodami: za pomocą przyklejanej podkładki z gwintem, na który wkręcano czujnik przyspieszeń, za pomocą magnesu trwałego łączącego przetwornik z kadłubem oraz za pomocą sondy ręcznej nakręconej na przetwornik przyspieszeń. Za pomocą magnesu trwałego nie wykonano pomiarów w punkcie pomiarowym 4, w pobliżu wejścia wału napędowego na moście napędowym nieprzelotowym MN4, ponieważ w tym miejscu kadłub przekładni wykonany jest ze stopu aluminium.

Specyficzna struktura wewnętrzną (*hardware*) zastosowanego analizatora drgań spowodowała, że ograniczono się do dowolnego określania wielkości wyjściowych dla rejestrowanego sygnału drganiowego oraz dowolnego doboru czasu i częstotliwości próbkowania rejestrowanego sygnału, a także do górnej granicy analizowanego pasma częstotliwości i rozdzielczości uzyskiwanego widma drgań. Można było zmieniać te parametry jedynie w ramach procedur dostępnych w stosowanym przyrządzie. Przykładowo, rejestrowany przebieg czasowy przyspieszeń drgań, wyrażanych w jednostkach przyspieszenia ziemskiego ($1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$), był całkowany do prędkości drgań, a następnie poddawany transformacji Fouriera, której moduł, jako widmo amplitudowo-częstotliwościowe zarejestrowanego sygnału, był wyrażany w mm/s. Podczas rejestrowania sygnału przez 16 obrotów wału napędowego z gęstością 200 próbek na jeden obrót tego wału (co dawało możliwość uzyskania 1600 linii widma) otrzymywano przebieg czasowy o czasie trwania równym trwaniu 8 obrotów tego wału. W efekcie porównania możliwości przyrządu i pożądaných w eksperymencie parametrów uzyskiwanych przebiegów czasowych oraz widm rejestrowanych sygnałów drganiowych ustalono parametry pracy silnika napędzającego i skrzyni biegów pokazane w tabeli 1. Operowanie wartościami przybliżonymi wynika z ograniczonej możliwości dokładnego sterowania prędkością obrotową wału korbowego silnika napędzającego stanowisko oraz ze specyficznego działania przyrządu pomiarowego.

W tabeli 1. pokazano parametry przebiegów czasowych i widm rejestrowanych sygnałów generowanych przez przyrząd pomiarowy. Tak dobrane wartości prędkości obrotowych wału napędowego na wejściach do badanych przekładni mostów napędowych (prędkości obrotowe wału korbowego silnika napędzającego i przełożenie skrzyni biegów) oraz zakres analizowanego pasma częstotliwości sygnału drganiowego pozwoliły na to, aby składowa harmoniczna tego sygnału, odpowiadająca prędkości obrotowej wałów napędowych (składowa związana z niewyrównoważeniem tych wałów), przypadała na częstotliwość 16 linii uzyskiwanego widma (a nie częstotliwość pośrednią między wyznaczanymi liniami), a składowa harmoniczna, odpowiadająca wchodzeniu w przypór kolejnych zębów przekładni głównych badanych mostów przypadała na częstotliwość 384 linii uzyskiwanego widma (ostatnia 1600 linia widma przypadała na górną granicę analizowanego pasma częstotliwości). Ograniczono się tylko do takich prostych założeń o uzyskiwanym sygnale, gdyż brak było szczegółowych informacji o wewnętrznej strukturze badanych mostów napędowych, rodzaju zastosowanych mechanizmów różnicowych i elementach blokujących te mechanizmy, o łożyskach kół przekładni głównych, łożyskach elementów mechanizmów różnicowych, łożyskach półosi napędowych itd. Znano jedynie liczby zębów kół zębatych tworzących przekładnie główne. Przy tych ograniczeniach obiekt badań traktowano jako „czarną skrzynkę”, niepozwalającą na dokładniejszą analizę struktury otrzymywanych sygnałów drganiowych i znacząco utrudniającą identyfikację wszystkich składowych harmonicznym tych sygnałów.

Tabela 1. Parametry pracy stanowiska pomiarowego

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika napędzającego n_s i wałów napędowych przy włączonym pierwszym biegu w skrzyni biegów n_w ,	Częstotliwość niewyważenia wałów napędowych f_w , częstotliwość zazębienia w przekładni głównej f_z	Górna granica analizowanego widma f_{max} i jego rozdzielczość f_o	Zapamiętany czas zarejestrowanego sygnału T_{max} i jego rozdzielczość T_s
$n_s \approx 660$ obr/min $n_w \approx 77,89$ obr/min	$f_w \approx 1,3$ Hz $f_z \approx 31,2$ Hz	$f_{max} = 130$ Hz $f_o = 0,08125$ Hz	$T_{max} \approx 6,15$ s $T_s \approx 0,003$ s
$n_s \approx 3050$ obr/min $n_w \approx 359,9$ obr/min	$f_w \approx 6$ Hz $f_z \approx 144$ Hz	$f_{max} = 600$ Hz $f_o = 0,375$ Hz	$T_{max} \approx 1,33$ s $T_s \approx 0,00065$ s

Źródło: opracowanie własne.

WYNIKI BADAŃ

W trakcie eksperymentu zarejestrowano 34 przebiegi czasowe i widma amplitudowo-częstotliwościowe sygnałów drganiowych (dla dwóch prędkości obrotowych wałów napędowych, dla sześciu punktów pomiarowych oraz dla trzech sposobów mocowania akcelerometru, po dwa dla każdego z punktów pomiarowych).

Na rysunku 2. pokazano porównanie uzyskanych widm sygnałów drganiowych zarejestrowanych w wybranym punkcie pomiarowym dla dwóch wartości częstotliwości obrotów wału napędowego i różnych sposobów mocowania akcelerometru. Stwierdzono, że zmiana sposobu mocowania czujnika nie wpływa znacząco na postać tych sygnałów — dominujące składowe harmoniczne mają te same częstotliwości i zbliżone amplitudy.

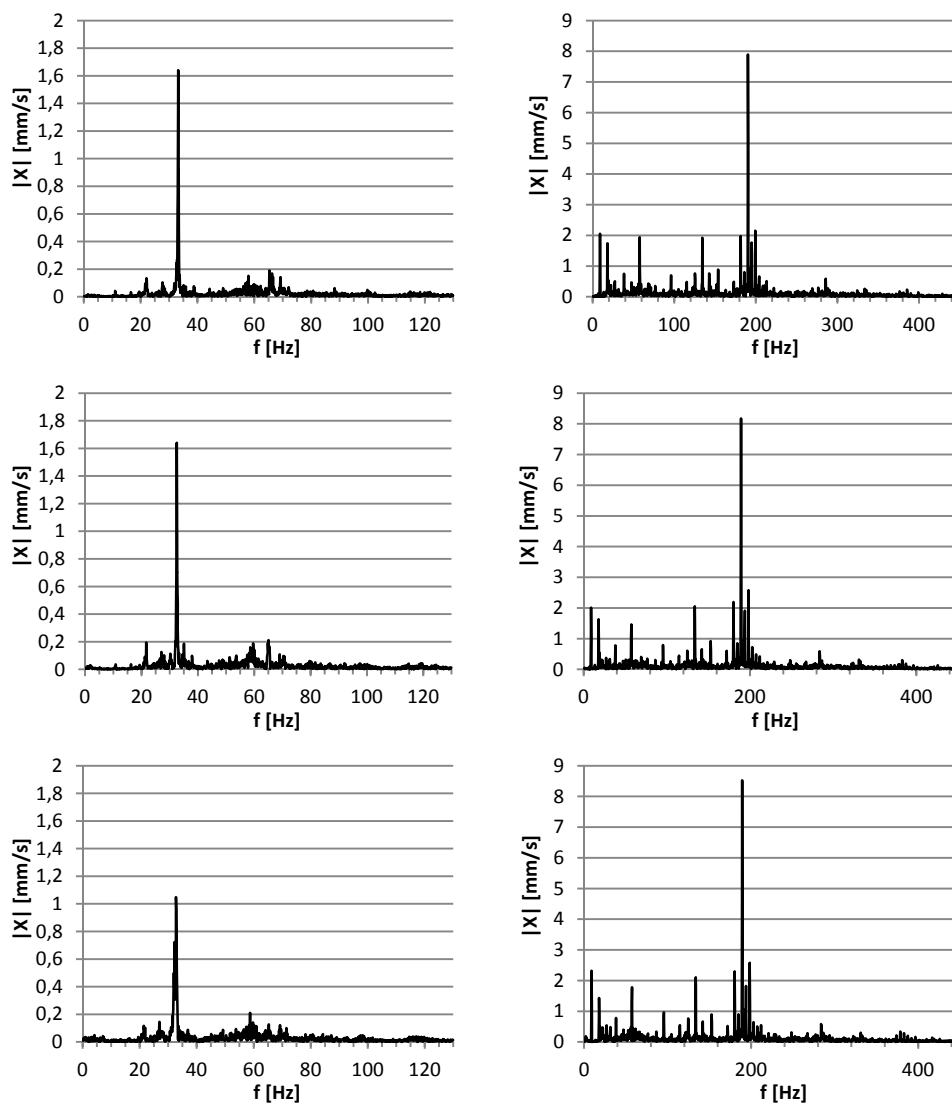
W ramach badań wstępnych postanowiono przeanalizować sygnały zarejestrowane przez czujnik mocowany do silnika za pomocą przyklejanej podkładki z gwintem, czyli mocowania najlepszego z zastosowanych. Na rysunkach 3. i 4. pokazano otrzymane widma sygnałów drganiowych zarejestrowanych przez czujnik mocowany w ten sposób we wszystkich punktach pomiarowych badanych przekładni mostowych z wybranymi częstotliwościami obrotów. Zarejestrowana struktura częstotliwościowa zarejestrowanych sygnałów drganiowych jest bardzo złożona. Dla tych samych warunków pracy występuje w nich wiele składowych harmonicznych o podobnych częstotliwościach, ale o zróżnicowanych amplitudach. Różnice widm otrzymywanych dla obu przekładni mostowych zostały wyznaczone przy tej samej częstotliwości obrotów wałów wejściowych i takiej samej skali pomiarowej.

Postać widm sygnałów drganiowych zarejestrowanych podczas pracy silnika na biegu jałowym pokazano na rysunku 3. Sygnały zarejestrowane we wszystkich punktach pomiarowych mostu napędowego MN3 zawierają wyraźnie dominującą składową harmoniczną o częstotliwości ~ 33 Hz, a więc trzykrotnie większej od częstotliwości obrotów wału korbowego silnika. Składowa ta jest związana z generowaniem przez silnik napędzający momentu napędowego (praca trzech cylindrów w trakcie jednego obrotu wału korbowego) i jest dominującą składową w widmie sygnału drganiowego z tego silnika [1, 3]. Dla badanych przekładni składowa ta jest więc zakłóceniem pochodzącym od zastosowanego źródła napędu, przenoszonym

przez kolejne elementy do pierwszego mostu, gdzie jest dominującą składową harmoniczną rejestrowanego sygnału drganiowego, i dalej do drugiego mostu, gdzie również jest najwyższą, choć już nie wyraźnie dominującą, składową harmoniczną rejestrowanego sygnału drganiowego. Znaczące amplitudy w sygnale drganiowym rejestrowanym na moście MN3 mają też pierwsza (~11 Hz) i druga (~22 Hz) harmoniczną częstotliwości obrotów wału korbowego silnika. W tej sytuacji źródła napędu bardzo mocno przenoszą się na przelotową przekładnię mostu napędowego MN3 i o wiele mniej, ale też wyraźnie, na przekładnię MN4. Kolejna wyraźna składowa harmoniczna sygnałów rejestrowanych na przekładni MN3 (~27,2 Hz) odpowiada pierwszej subharmonicznej częstotliwości zazębienia się koła zębatego na wałku pośrednim z kołem zębatym na wałku wyjściowym zastosowanej skrzyni biegów (~54,5 Hz). Należy zwrócić uwagę na fakt, że niewidoczne są składowe harmoniczne związane z obracaniem się wałów napędowych (~1,3 Hz) i z zazębieniem się kół przekładni głównych (~31,2 Hz), czyli że pracują one w sposób niewywołujący drgań poprzecznych kadłubów badanych przekładni głównych.

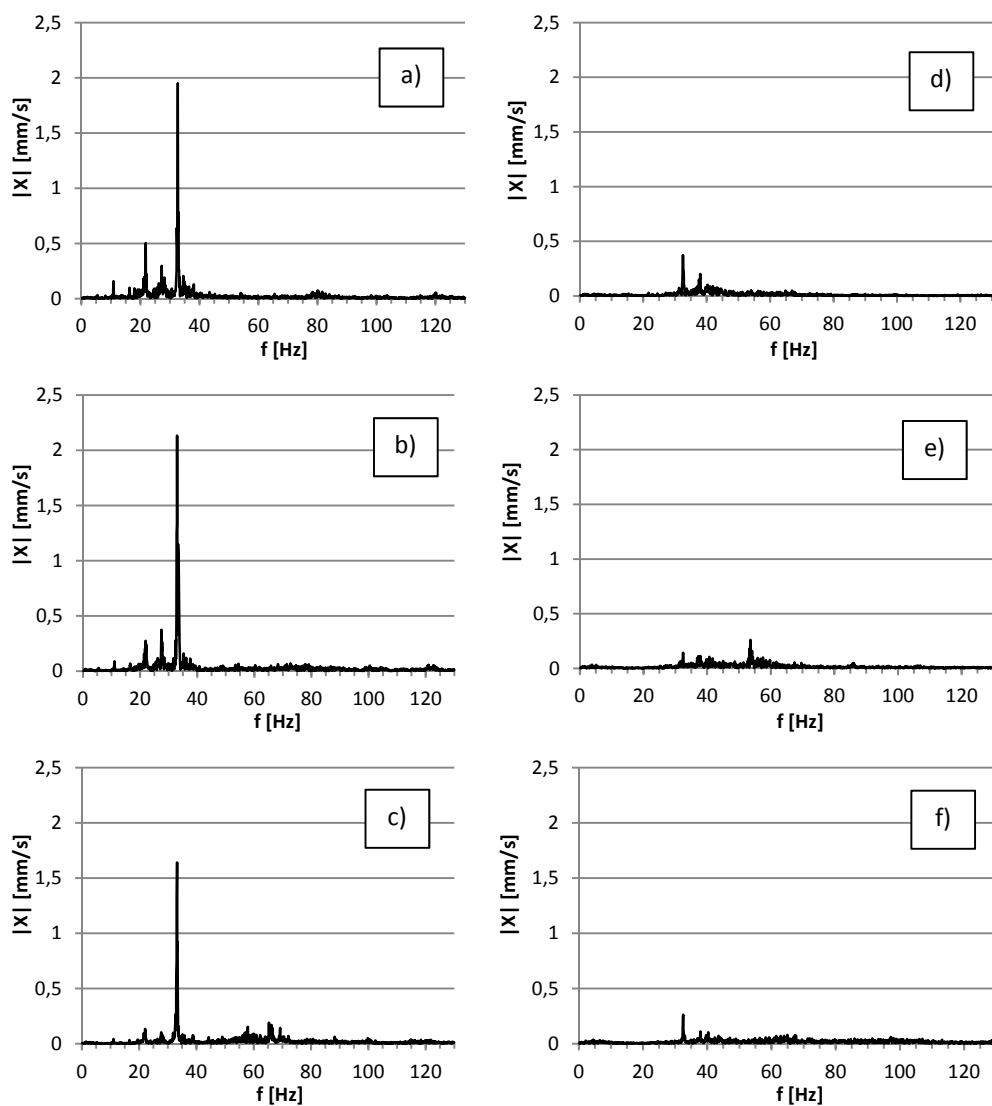
Postać widm sygnałów drganiowych zarejestrowanych dla maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędzającego pokazano na rysunku 4. Również i w tych widmach sygnałów drganiowych dominują głównie zakłócenia będące subharmonicznymi (~22,5 Hz) i harmonicznymi (~50,5 Hz, ~101,6 Hz, ~152,4 Hz i ~202,9 Hz) częstotliwości obrotów wału korbowego zastosowanego silnika napędzającego (~50,5 Hz) oraz subharmoniczną (~126,75 Hz) i harmoniczną (~251,6 Hz), a także częstotliwości zazębienia się koła zębatego na wałku pośrednim z kołem zębatym na wałku wyjściowym zastosowanej skrzyni biegów (~251,6 Hz).

Widoczne są też składowe harmoniczne o częstotliwościach odpowiadających pierwszej (~6 Hz), drugiej (~12 Hz) i trzeciej (~18 Hz) harmonicznej częstotliwości obrotów wałów napędowych (~6 Hz) oraz szereg składowych o małych amplitudach w całym analizowanym zakresie częstotliwości.



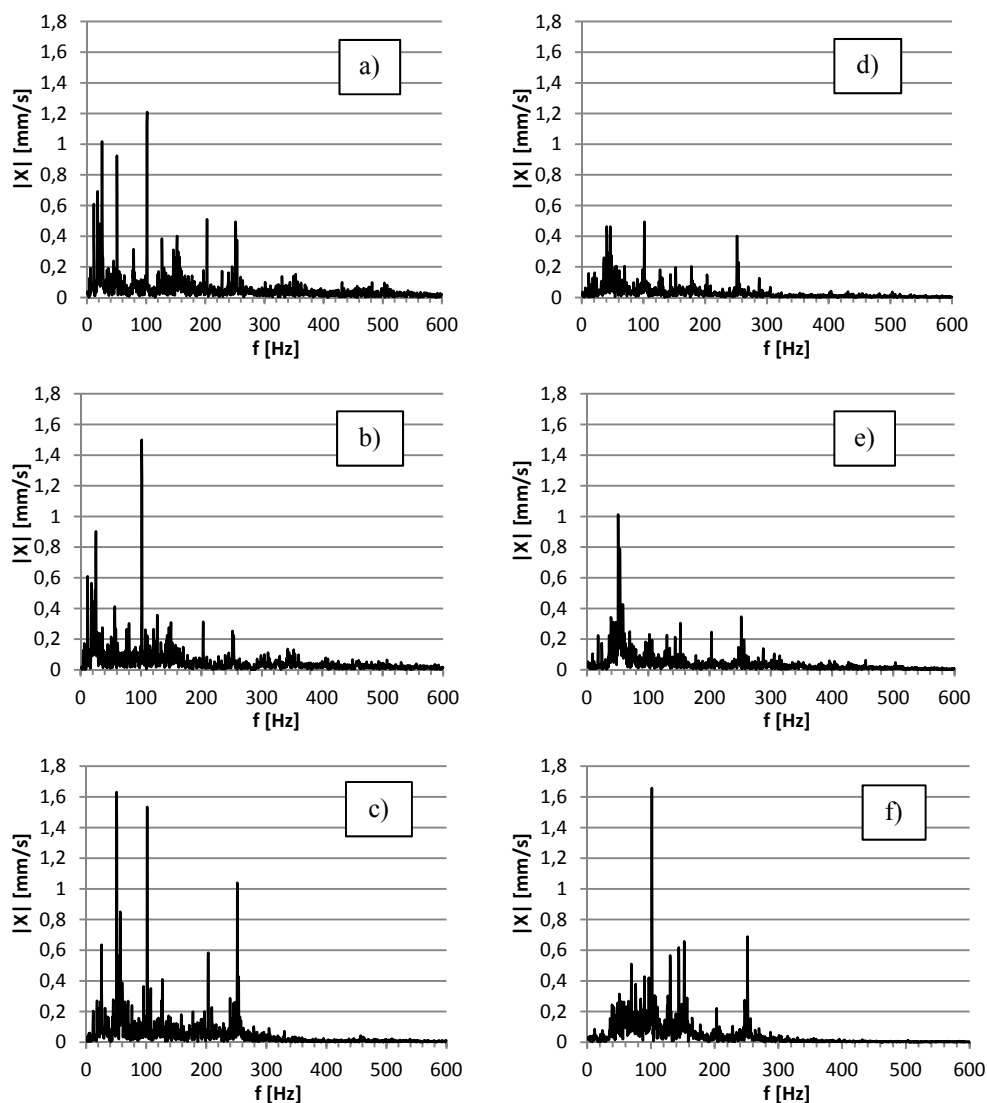
Rys. 2. Porównanie uzyskanych widm sygnałów zarejestrowanych przez czujnik mocowany za pomocą przyklejanej podkładki z gwintem (rysunki górne), za pomocą magnesu trwałego (rysunki środkowe) oraz za pomocą ręcznej sondy (rysunki dolne) w punkcie pomiarowym na wyjściu wału napędowego z mostu MN3 (punkt pomiarowy nr 3) dla częstotliwości obrotów wału napędowego 1,3 1/s (rysunki lewe) i 4,5 1/s (rysunki prawe)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Otrzymane widma sygnałów drganiowych zarejestrowanych przez czujnik mocowany za pomocą przyklejanej podkładki z gwintem w punkcie pomiarowym (oznaczenia wg rys. 1.): a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, d) nr 4, e) nr 5, f) nr 6 przy napędzaniu mostów przez silnik napędzający pracujący na biegu jałowym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Otrzymane widma sygnałów drganiowych zarejestrowanych przez czujnik mocowany za pomocą przyklejanej podkładki z gwintem w punkcie pomiarowym (oznaczenia wg rys. 1.): a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, d) nr 4, e) nr 5, f) nr 6 przy napędzaniu mostów przez silnik napędzający pracujący z maksymalną częstotliwością obrotów wału korbowego

Źródło: opracowanie własne.

Analiza otrzymanych widm sygnałów drganiowych wskazuje, że przy pewnej znajomości wibroakustycznej charakterystyki zastosowanego źródła napędu (silnika i skrzyni biegów), przekładni mostów napędowych i bardzo ograniczonej wiedzy o wibroakustycznej charakterystyce tych przekładni większość składowych harmonicznych wyraźnie widocznych w widmach udało się powiązać z pracą zastosowanego źródła napędu. Są one zakłóceniami, które należy wyeliminować.

Udało się powiązać wybrane składowe harmoniczne zarejestrowanych sygnałów z pracą badanych przekładni mostów napędowych. Przykładowo, składowe harmoniczne o częstotliwościach będących wielokrotnościami częstotliwości obrotów wałów napędowych, wyraźnie widoczne w widmach sygnałów zarejestrowanych na przekładni MN3, mogą świadczyć na przykład o niewyrównoważeniu wału napędowego przechodzącego przez tę przekładnię i zamocowanego na niej koła atakującego przekładni głównej.

Ze względu na otrzymane postacie widm amplitudowo-częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów drganiowych i stwierdzoną w tych sygnałach obecność silnych zakłóceń pochodzących między innymi od zastosowanego źródła napędu elementów badanych przekładni mostów napędowych, podczas próby oceny możliwości opracowania wibroakustycznej metody diagnozowania przekładni mostowych ograniczono się tylko do analizy wybranych widm. Analiza przebiegów czasowych rejestrowanych sygnałów drganiowych (np. wyznaczanie wartości średniego poziomu skutecznych czy międzyszczytowych przyspieszeń drgań oraz ich współczynników spłaszczenia, asymetrii, szczytu, impulsowości, kształtu itp. oraz przeprowadzenie analizy wg [2]) będzie przeprowadzona w kolejnych etapach badań, po wyeliminowaniu z rejestrowanych sygnałów drganiowych składowych harmonicznych niezwiązanych z pracą mechanizmów badanych mostów napędowych, a przynajmniej przypisanych zastosowanemu źródłu napędu tych przekładni tak, aby wyznaczane parametry przebiegów czasowych rejestrowanych sygnałów drganiowych można było uznać za jak najbardziej charakterystyczne tylko dla badanych przekładni mostów napędowych. Wyeliminowanie zakłóceń pochodzących od zastosowanego w trakcie badań źródła napędu mostów napędowych jest warunkiem możliwości opracowania metody wibroakustycznego diagnozowania tych przekładni głównych mostów KTO Rosomak, opartej na badaniu parametrów przebiegów czasowych

rejestrowanych sygnałów drganiowych i niewymuszającej konieczności stosowania właśnie takiego źródła napędu.

WNIOSKI

1. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że do rejestracji sygnału pomiarowego w przypadku badanych przekładni głównych mostów wystarczające jest mocowanie akcelerometrów za pomocą magnesu trwałego lub stosowanie sondy ręcznej. Charakterystyczne częstotliwości sygnałów są małe, co nie powoduje dużych zniekształceń sygnału.
2. Widma zarejestrowanych sygnałów drganiowych zawierają szereg wyraźnie zarysowanych składowych harmonicznym. Część z nich powiązano z konkretnymi elementami badanych przekładni mostów napędowych. Mogą one posłużyć do opracowania metody diagnostycznej. Do rozwiązania pozostaje problem radykalnego ograniczenia zakłóceń od silnika napędzającego stanowisko i od zamontowanej na nim skrzyni biegów.
3. W dalszym etapie będą prowadzone badania dla przekładni głównych mostów pracujących pod obciążeniem. Pozwolą one na określenie wpływu wielkości obciążenia na postać rejestrowanych sygnałów drganiowych i dokładniejszą ocenę diagnostyczną przekładni.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2012 jako projekt rozwojowy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Boruta B., *Analiza informacji diagnostycznej zawartej w sygnale wibroakustycznym o parametrach regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego*, rozprawa doktorska, PP, Poznań 2006.
- [2] Boruta G., Jasiński M., *Wykorzystanie analizy składowych głównych w diagnostyce silników o zapłonie samoczynnym*, „Diagnostyka”, 2005, Vol. 34, s. 43–50.

- [3] Boruta G., *Ocena wybranych parametrów regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym na podstawie sygnału wibroakustycznego*, „Diagnostyka”, 2008, nr 2(46), s. 179–188.
- [4] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN, Warszawa 1989.
- [5] Walentynowicz J., Trawiński G., Wieczorek M., Dyga G., *Stanowisko i metodyka badań mostów napędowych kołowego transportera ROSOMAK po uszkodzeniach bojowych*, [w:] *Technologie podwójnego zastosowania*, red. A. Najgebauer, WAT, Warszawa 2012.

PRELIMINARY DIAGNOSTICS INVESTIGATION OF AXLES FINAL DRIVE FOR AMV ROSOMAK BASED ON VIBRATION SIGNAL

ABSTRACT

It has been assessed engine test bench usefulness for vibroacoustic process's studies which accompany to AMV Rosomak driving axle's operating. The way of available measurement and analysis equipment utilization has been given. There are presented the amplitude-frequency spectrum of vibration signals registered by accelerometer which is mounted in various ways in a few measuring points on driving axle's body. The conclusions and recommendations regarding of further studies has been formed.

Keywords:

axles driving, diagnostics, vibroacoustic signal.