

STUDY OF STOCHASTICS OF LOAD IN ASPECT OF DEFINING THE FATIGUE LIFE OF A MULTIPURPOSE SET FOR PLANTING POTATOES

Summary

The article presents a study of stochastic loads. The research was performed for calculation of fatigue life of potato planter. The effect of loads on stress at selected locations on the structure was calculated. Spectral analysis was carried out and sources of frequency bands of stress were localized. Coherence between signals was calculated and spectral transmittance of the system was computed. The obtained information shall be used for estimating the fatigue life of machine.

Key words: potatoes, potato planters, fatigue life, stochastic, analysis

STUDIUM STOCHASTYKI OBCIĄŻEŃ W ASPEKTCIE ZDEFINIOWANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ WIELOCZYNNYŚCIEWEGO AGREGATU DO SADZENIA ZIEMNIAKÓW

Streszczenie

W artykule zawarto opis studium stochastyki obciążeń. Badania przeprowadzono na potrzeby oszacowania trwałości zmęczeniowej agregatu do sadzenia ziemniaków. Określono wpływ obciążeń na naprężenia w wybranych miejscach konstrukcji. Przeprowadzono analizę widmową sygnałów i zidentyfikowano źródła pochodzenia poszczególnych pasm częstotliwości naprężeń. Obliczono funkcję koherencji zwyczajnej pomiędzy badanymi sygnałami oraz wyznaczono transmitancje widmowe układu. Zebrane dane są podstawą do dalszych rozważań na temat wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji.

Słowa kluczowe: ziemniaki, sadzarki do ziemniaków, trwałość zmęczeniowa, stochastyka, analiza

1. Wstęp

Zgodnie z definicją zmęczeniem materiału nazywamy zjawisko pęknięcia materiału pod wpływem cyklicznie zmieniających się naprężeń [1]. Nauką zajmującą się badaniem jak rzeczy zmieniają się w czasie i o siłach, które są przyczyną tych zmian jest dynamika maszyn [2]. Studium dynamiki obiektu technicznego pozwala na zrozumienie zasad jego funkcjonowania. W szczególności pozwala na określenie zmian stanu obciążeń dynamicznych i przewidywanie zachowań układu. W aspekcie szacowania trwałości zmęczeniowej maszyn rolniczych studium dynamiki umożliwi określenie wpływu widma sił obciążającego konstrukcję na powstający stan wyęczenia. Analizy te pozwolą na ustalenie źródeł pochodzenia poszczególnych składników obciążenia i na przeciwdziałanie negatywnym ich skutkom np. poprzez zmiany konstrukcyjne, zmiany materiału itp.

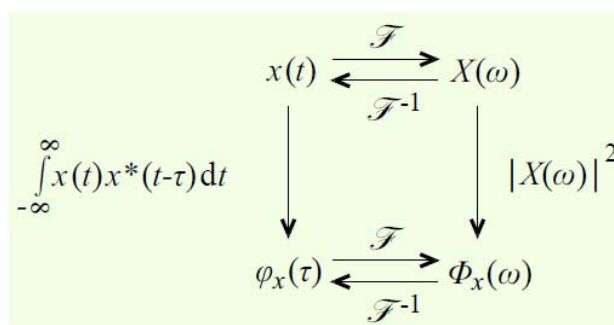
W niniejszym artykule zamieszczono opis studium stochastyki obciążeń wykonanego w celu oceny trwałości zmęczeniowej wieloczynnościowego agregatu do sadzenia ziemniaków.

2. Studium stochastyki obciążeń

Na potrzeby oszacowania trwałości zmęczeniowej agregatu do sadzenia ziemniaków przeprowadzono studium stochastyki obciążeń, przy czym zwrot "obciążenie" potraktowano umownie. Terminem tym określono ogólnie sygnały wejściowe, których skutkiem jest obciążenie obiektu [7]. Do tego celu dla analizowanych przebiegów konieczne jest obliczenie gęstości widmowej mocy sygnałów (PSD). Charakterystyka ta z kolei pozwala na wyznaczenie funkcji koherencji, która określa, jaka część i które częstotliwości (lub całe pasma) mocy sygnału wejściowego znajdują się w sygnale wyjściowym.

W celu realizacji zadania przyjęto założenie, że wartości średnia i funkcja autokorelacji procesu stochastycznego opisującego wartości obciążeń działających na konstrukcję w czasie są stałe, co oznacza przyjęcie stacjonarności procesu w szerszym sensie.

Widmowa gęstość mocy sygnału G opisuje jego ogólną strukturę częstotliwościową. Charakterystykę tę można wyznaczyć jako transformatę Fouriera funkcji autokorelacji, lub poprzez kwadrat gęstości widmowej sygnału (rys. 1).



Rys. 1. Związki między sygnałem a jego charakterystykami [4]

Fig. 1. The relationship between the signal and its characteristics [4]

W analizowanych przypadkach w celu poprawy wizualizacji wyników wyznaczonych gęstości widmowych mocy badanych sygnałów oraz w celu obliczenia funkcji koherencji stosowano uśrednianie sygnału. Ponadto, z uwagi na brak obecności w analizowanych sygnałach dużych amplitud dla częstotliwości powyżej 20 Hz, zastosowano filtrowanie sygnału filtrem dolnoprzepustowym.

Funkcję koherencji zwyczajnej zdefiniowano zgodnie z [5]:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)}, \quad (1)$$

gdzie:

$G_{xx}(f)$ - gęstość widmowa mocy sygnału wejściowego,

$G_{yy}(f)$ - gęstość widmowa mocy sygnału wyjściowego,

$G_{xy}(f)$ - wzajemna gęstość widmowa mocy sygnałów wejściowego i wyjściowego.

Charakterystyka ta jest obliczana dla wybranych częstotliwości i może przybierać wartości z przedziału od 0 do 1. Wartość 0 oznacza brak koherencji, czyli brak związku pomiędzy badanymi funkcjami. Wartość 1 oznacza, że sygnały (dla danej częstotliwości) są koherentne. Jeżeli funkcja koherencji jest większa od zera, ale mniejsza od jedności, to występuje co najmniej jeden z trzech możliwych przypadków:

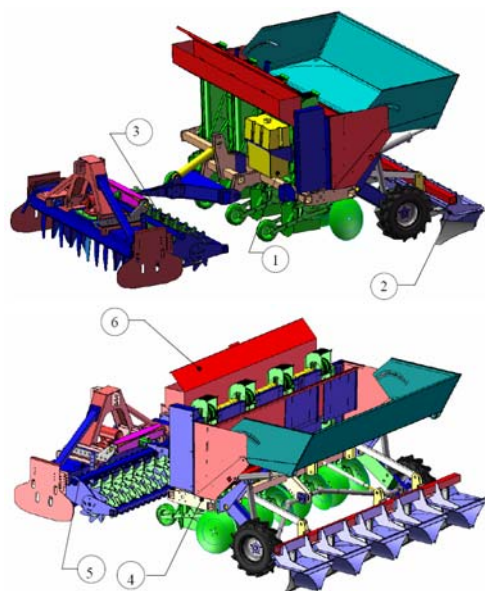
- wyniki pomiarów są obciążone błędem wynikającym z obecności szumów zewnętrznych,
- układ wiążący ze sobą sygnały jest nieliniowy,
- sygnał wyjściowy y wynika nie tylko z sygnału wejściowego x , ale również z innych sygnałów wejściowych.

W celu ilościowego określenia wpływu sygnału wejściowego na wyjściowy wyznaczono transmitancję widmową $H(f)$ sygnałów, zdefiniowaną zgodnie z [8] jako funkcję zespoloną o postaci:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)}, \quad (2)$$

2.1. Opis przedmiotu badań

Przedmiotem badań był przedstawiony na rys. 2 wielofunkcyjny agregat do sadzenia ziemniaków.



Rys. 2. Widok ogólny urządzenia wielofunkcyjnego do sadzenia ziemniaków: 1) urządzenie do zaprawiania sadzaniaków, 2) urządzenie do formowania redlin, 3) wymienne wały uprawowe, 4) sadzarka, 5) brona rotacyjna, 6) siewnik [3]

Fig. 2. General view of a multifunction device for planting potatoes: 1) Device for seed dressing, 2) Device for forming ridges, 3) Interchangeable growing shafts, 4) Planter, 5) Rotary harrow, 6) Seeder [3]

Agregat przeznaczony jest do automatycznego sadzenia ziemniaków i jednoczesnego doprawiania gleby, zaprawiania sadzaniaków środkami płynnymi, wysiewu granulowanych nawozów mineralnych i formowania redlin. Masa sadzarki wynosi 3000 kg, a maksymalna ładowność zbiornika 2500 kg [3].

2.2. Charakterystyka przypadków eksploatacyjnych

Główne źródła naprężeń powstające w trakcie eksploatacji sadzarki są następujące.

- W przypadku przejazdów bez realizacji procesów technologicznych (np. dojazd do pola po drogach publicznych) - siły w punkcie styku kół z nawierzchnią i w miejscu mocowania agregatu z ciągnikiem poprzez TUZ.
- W trakcie realizacji procesów technologicznych - siły powstające podczas pracy zaprawiarki, urządzenia do formowania redlin, wałów doprawiających, sadzarki i brony rotacyjnej, a także siły w punkcie styku kół z nawierzchnią i w miejscu mocowania agregatu z ciągnikiem poprzez TUZ.

Wyniki pomiarów naprężeń i przyspieszeń podczas pracy sadzarki w wielu przypadkach eksploatacyjnych zamieszczono w opracowaniu [6]. Analizę dwóch z nich (rys. 3) przedstawiono w niniejszej pracy.

1. Przypadek 1 – przejazd agregatu z ładunkiem po drodze asfaltowej z prędkością $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
2. Przypadek 2 – przejazd agregatu z ładunkiem po nierównościach z prędkością $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

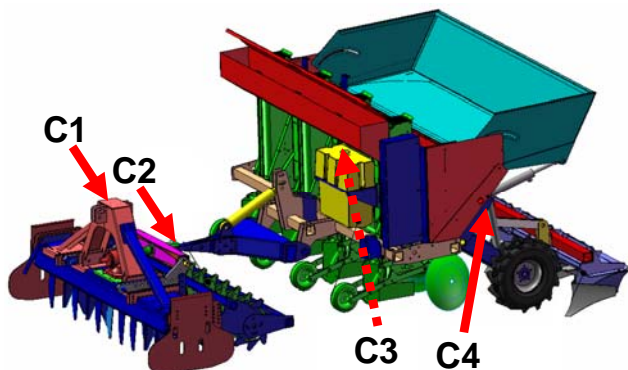


Rys. 3. Przejazd sadzarki po drodze publicznej i po nierównościach z ładunkiem

Fig. 3. Fully loaded planter on public road and a field

2.3. Metoda pomiaru obciążeń i naprężeń

Do identyfikacji obciążeń działających na konstrukcję wykorzystano czujniki przyspieszeń, które zainstalowano w sąsiedztwie kół agregatu, na dyszlu i w okolicy mocowania do TUZ ciągnika (rys. 4).



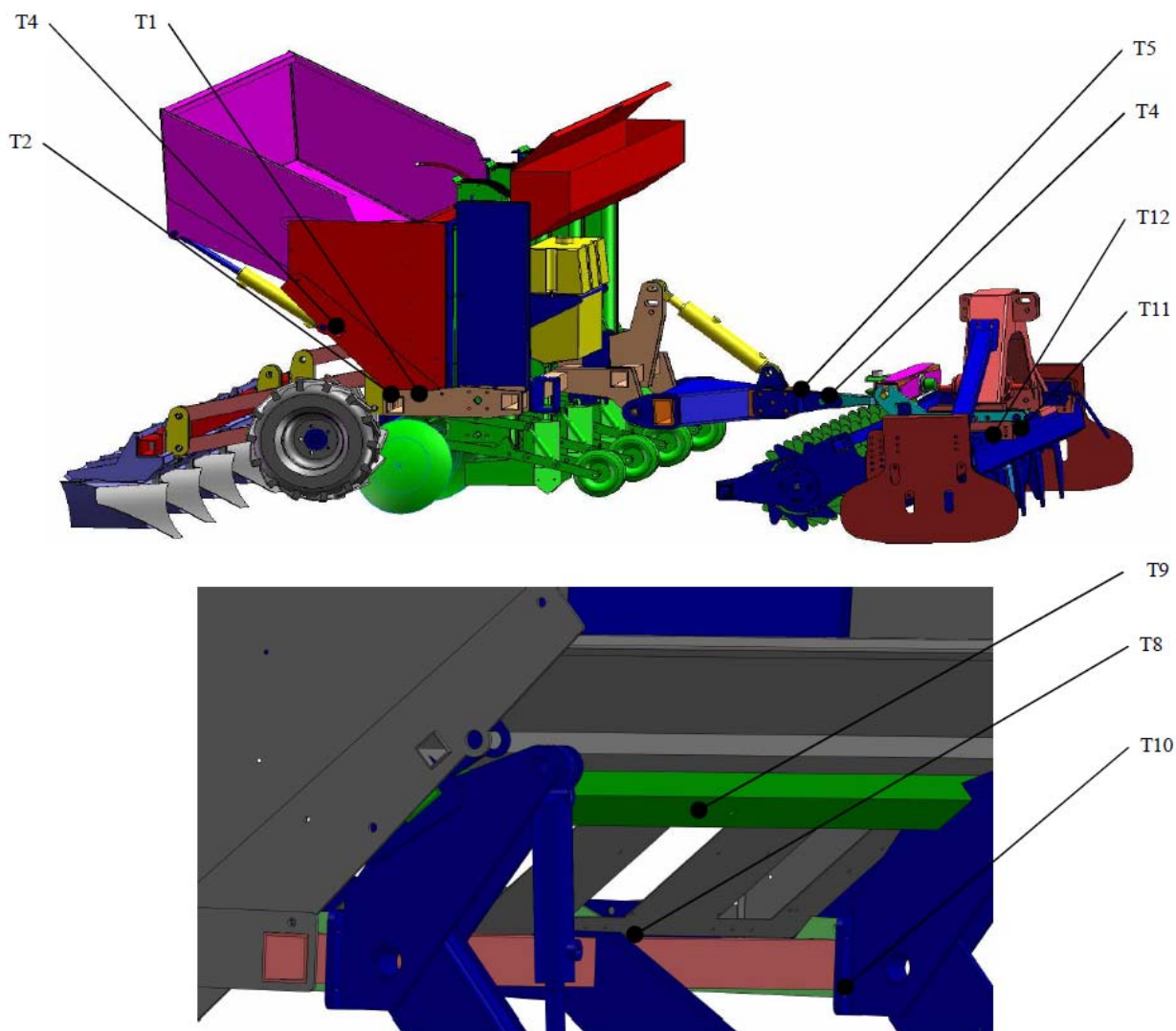
Rys. 4. Rozmieszczenie czujników przyspieszeń
Fig. 4. Acceleration sensors arrangement

Z tego względu, że czujniki przyspieszeń znajdowały się blisko miejsc, z których pochodziły obciążenia, przyjęto iż rejestrowane przez dany czujnik przyspieszenia są linio-

wo zależne od obciążeń zewnętrznych pochodzących z jednego źródła. W związku z tym, w celu określenia wpływu obciążeń na stan wyężenia, oceniono wpływ przyspieszeń wzdłuż istotnych osi na naprężenia. Mianem osi istotnych określono osie czujników zgodnie z osią pionową pojazdu. W przypadku C1 jest to oś Z czujnika, a w przypadku C3 i C4 oś Y czujnika.

Naprężenia mierzono za pomocą jednokierunkowych czujników tensometrycznych o symbolu TF 5/120. Wyszczególniono 12 pozycji (rys. 5).

- T1 – płyta boczna ramy nośnej,
- T2 – tylna belka ramy nośnej, spaw,
- T3 – belka spinająca boki zbiornika stałego,
- T4 i T5 – dyszel, połączenia spawane,
- T6 i T7 – belka spinająca TUZ z belką spinającą boki zbiornika stałego,
- T8 – przednia belka ramy nośnej, spaw,
- T9 – belka spinająca boki zbiornika stałego,
- T10 – spaw uchwytu mocowania urządzenia do formowania redlin,
- T11 – zbiornik olejowy brony aktywnej, część wewnętrzna,
- T12 – zbiornik olejowy brony aktywnej, przy zastrzale dyszla zaczepowego.

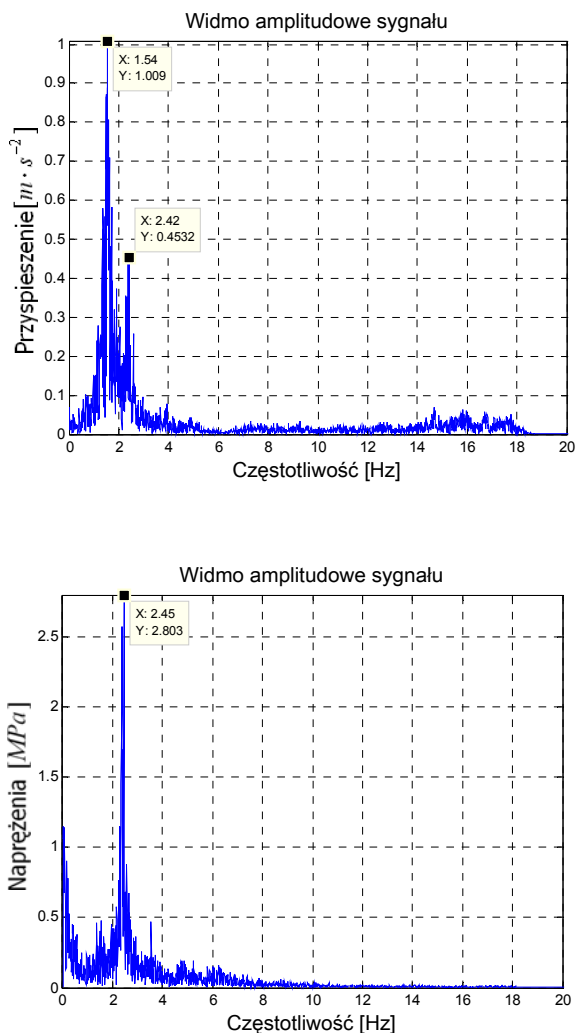


Rys. 5. Rozmieszczenie czujników tensometrycznych [6]
Fig. 5. Strain gauge arrangement [6]

2.4. Analiza przypadku 1 – przejazd agregatu z ładunkiem po drodze asfaltowej z prędkością 20 km·h⁻¹

Do dalszych analiz wybrano tensometry T3, T4, T6 i T8 ze względu na relatywnie duże naprężenia amplitudowe i z uwagi na fakt, że tensometry te reprezentują różne punkty konstrukcji.

Obliczono widma amplitudowe sygnałów z czujników przyspieszeń oraz widma amplitudowe sygnałów z tensometrów (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe widma amplitudowe - sygnał z czujnika przyspieszeń C1 (wykres po lewej) i sygnał z tensometru 3 (wykres po prawej) – przypadek 1

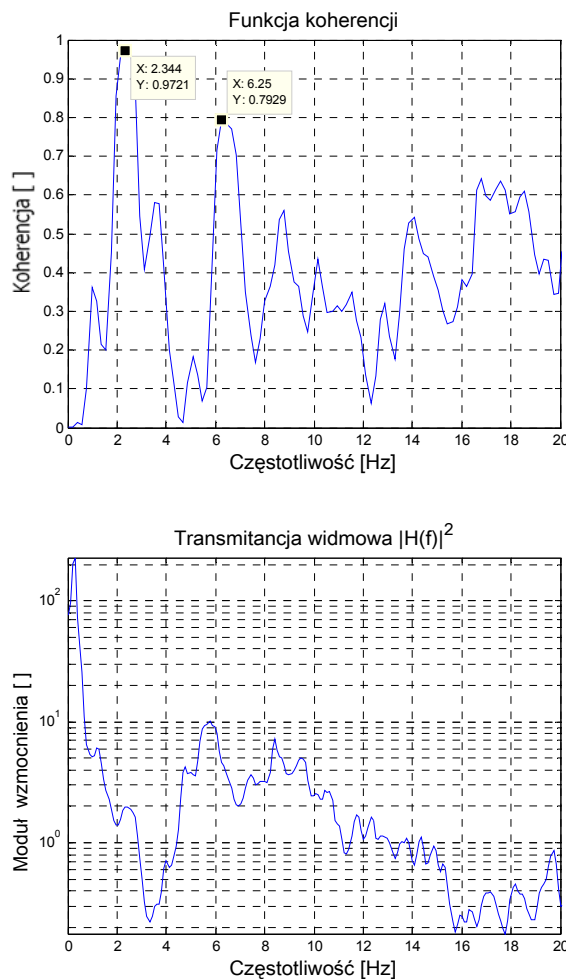
Fig. 6. Examples of amplitude spectra - acceleration sensor signal C1 (left graph) and the signal from the strain gauge 3 (right graph) - Case 1

Funkcję koherencji oraz transmitancję wyliczono pomiędzy sygnałami z czujników przyspieszeń C1 i C3 i sygnałami z tensometrów T3, T4, T6, T8. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 7.

W celu zidentyfikowania źródeł pochodzenia drgań o zarejestrowanych częstotliwościach wykonano na wirtualnym modelu agregatu do sadzeniaków ziemniaków analizy pozwalające określić postacie i wartości drgań własnych układu (rys. 8).

Na podstawie zebranych danych stwierdzono, że głównym źródłem naprężeń w górnej półce dyszla (T4) są drgania o częstotliwości 1.5 Hz. Ze względu na większe tłumie-

nie wyższych częstotliwości, wartość 2.3 Hz nie generuje takich skutków jak 1.5 Hz. Oscylacje pionowe w okolicach dyszla o częstotliwości 1.5 Hz pochodzą od pierwszej postaci drgań własnych układu. Niska wartość częstotliwości ma związek z małą sztywnością połączenia.



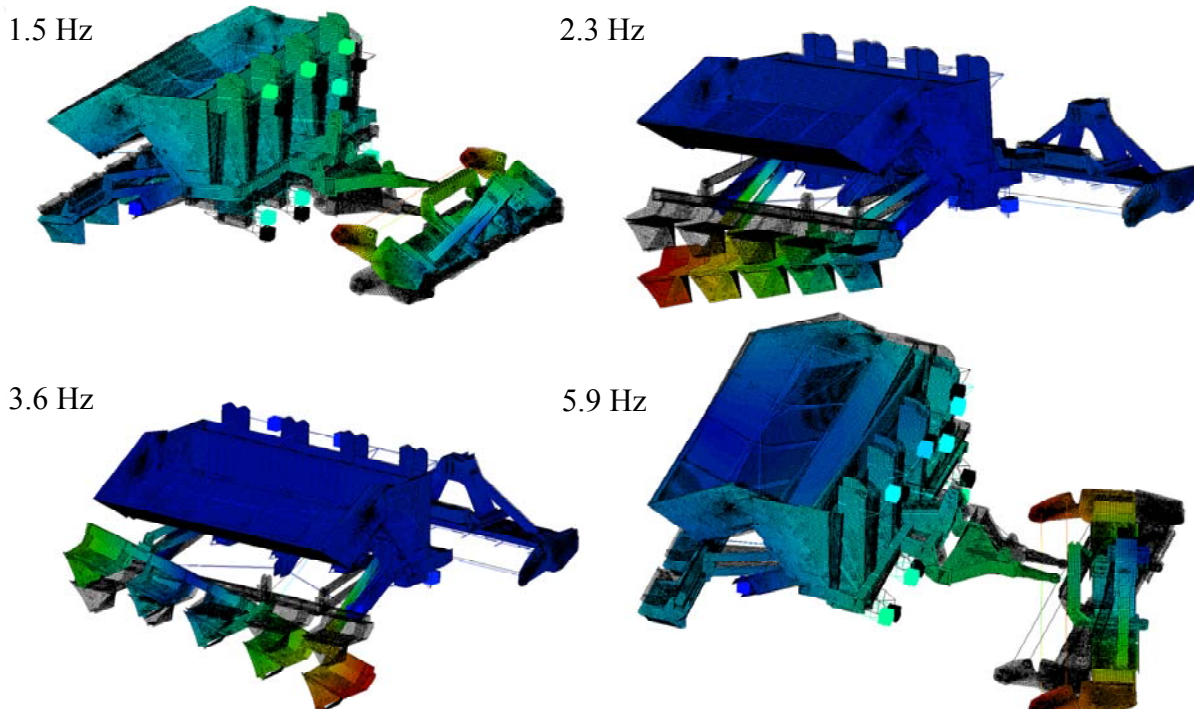
Rys. 7. Funkcja koherencji i transmitancja pomiędzy sygnałem z czujnika przyspieszenia C3 a sygnałem z tensometru T3 dla przypadku 1

Fig. 7. The coherence function and spectral transmittance between the signal of the acceleration sensor C3, and the signal from the strain gauge T3 for case 1

Naprężenia w pobliżu mocowania koła (T3) zależą w istotnym stopniu tylko od drugiej postaci drgań własnych. Świadczy o tym wysoka koherencja dla częstotliwości 2.3 Hz oraz nieco mniejsza dla 3.5 Hz.

Analiza pomiarów z czujnika T6 (belka spinająca mocowanie dyszla z belką łączącą boki zbiornika stałego) pozwala wyciągnąć wnioski takie same jak w przypadku czujnika T4 (przeważają naprężenia o częstotliwości 1.5 Hz).

Rezultaty pomiarów z czujnika T8 przekonują, że naprężenia w przedniej belce maszyny pochodzą z wymuszeń przenoszonych przez dyszel i przez koła – w obu przypadkach wysoka koherencja. Amplituda wymuszeń pochodząca od kół jest większa niż amplituda wymuszeń pochodząca od dyszla. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w widmie amplitudowym sygnału z T8 (amplituda naprężeń dla 2.4 Hz jest 30% wyższa niż dla 1.5 Hz).



Rys. 8. Częstotliwości drgań własnych sadzarki do ziemniaków
 Fig. 8. Vibrations frequency of potato planter

Niskie wartości modułu wzmocnienia (odczytane z wykresów transmitancji widmowej) dla częstotliwości, przy których zmierzono wysokie amplitudy, świadczy, że układ jest dość dobrze tłumiony. Wysokie wzmocnienie występuje dla częstotliwości, przy których amplitudy mają pomijalnie niskie wartości (z punktu widzenia szacowania trwałości). Układ przejawia cechy filtra dolnoprzepustowego.

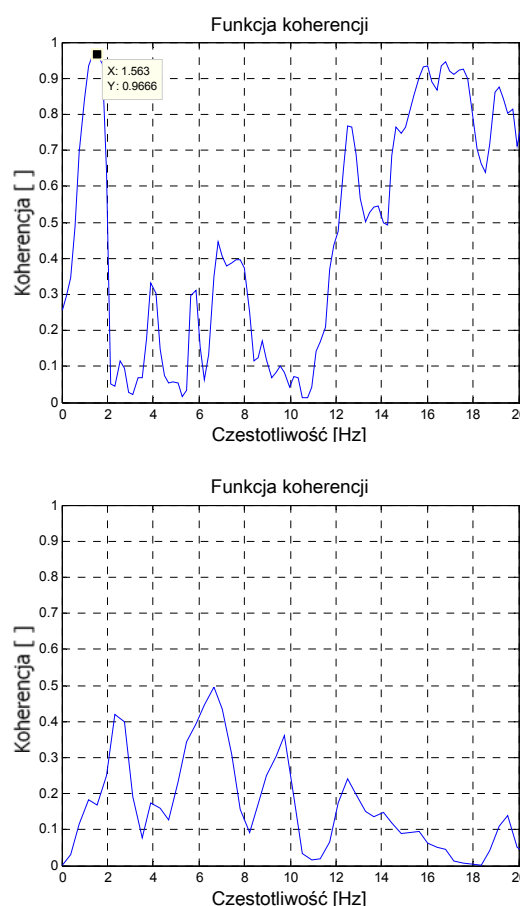
Reasumując, z analizy wynika, że głównym źródłem ewentualnych pęknięć zmęczeniowych będą drgania z częstotliwościami rezonansowymi wywołane przez siły zewnętrzne.

3. Analiza przypadku 2 - przejazd agregatu z ładunkiem po nierównościach z prędkością 10 km·h⁻¹

Dla przejazdu z ładunkiem po nierównościach zaobserwowano ogólny spadek koherencji dla częstotliwości rezonansowych (szczególnie dla wartości 1.5 Hz – pierwsza postać drgań własnych). Brak wyraźnej dominacji tychże częstotliwości w widmach amplitudowych sygnałów z czujników wymuszeń (widmo „rozciągnęło” się na sąsiednie wartości) wynika z oddziaływania na konstrukcje obciążeń o charakterze losowym. Innymi słowy drgania o częstotliwościach własnych agregatu nie mają szans się rozwinąć na tyle by mogły zostać zarejestrowane przez tensometr, gdyż pobudzenie miało charakter szerokopasmowy, a amplituda wymuszeń dla częstotliwości rezonansowych była niska.

Szczególnie wyraźnie zmieniły się relacje pomiędzy gęstością widmową sygnału tensometru T8 rejestrującego naprężenia w belce przedniej łączącej obie burty skrzyni ładowniczej a gęstością widmową czujników przyspieszeń (funkcja koherencji dla przypadku jazdy po drodze dla 1.5 Hz spadła z 0.97 do ok. 0.25 – rys. 9).

Reasumując, w analizowanym przypadku na stan wytężenia konstrukcji znaczący wpływ mają obciążenia pochodzące od drgań szerokopasmowych powstałych podczas przejazdu po nierównym gruncie, co uzasadnia niską koherencją w zakresie częstotliwości rezonansowych



Rys. 9. Zmiany funkcji koherencji pomiędzy sygnałem z czujnika przyspieszenia C3 a sygnałem z tensometru T8 dla przejazdu po drodze asfaltowej (po lewej) i przejazdu po nierównościach (po prawej)

Fig. 9. Changes in the coherence function between the signal of the acceleration sensor C3 and T8 strain gauge signal from an asphalt road (left) and a field (right)

i spłaszczone widma sygnałów z tensometrów (względem widm uzyskanych dla przejazdów po drogach publicznych).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone studium sygnału dało istotne informacje o zachowaniach struktury pod wpływem obciążeń zmiennych w czasie. Wyszczególniono trzy dominujące częstotliwości drgań własnych układu, które w zależności od obciążenia miały wartość: ok. 1.5 Hz, ok. 2.5 Hz i ok. 3.5-4 Hz.

W przypadku jazdy po drodze publicznej zauważono silne wzmocnienie sygnału wyjściowego względem wejściowego dla częstotliwości 5-6 Hz (np. tensometr T3 i T4 dla przypadku 4) i wyraźne osłabienie dla pierwszych dwóch częstotliwości rezonansowych. Podejrzewa się, że wymuszenia o tej częstotliwości pochodzą bezpośrednio od oddziaływań agregatu z nawierzchnią. Jednak obserwowane amplitudy przy tych częstotliwościach osiągają wartości niskie, stąd ich wpływ na trwałość jest pomijalnie mały. Istotne znaczenie mają naprężenia amplitudowe o częstotliwościach zgodnych z rezonansowymi.

W przypadku jazdy po nierównościach zaobserwowano ogólny spadek koherencji pomiędzy sygnałami. Widma sygnałów z tensometrów uległy rozciągnięciu na częstotliwości z zakresu od 0 do 6 Hz i ogólnie wzrósł współczynnik wzmocnienia pomiędzy sygnałami (względem pomiarów uzyskanych dla przejazdu po drodze publicznej). Powstający stan naprężeń pochodzi w głównej mierze od wymuszeń szerokopasmowych.

Zebrane dane są podstawą do dalszych rozważań dotyczących analiz trwałościowych obiektu. Mogą posłużyć do obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji lub będą podstawą do przeprowadzenia programowanych badań zmęczeniowych, w których pomija się niskie poziomy naprężeń (np. badania prowadzone będą przy częstotliwo-

ściach wymuszeń generujących największe naprężenia). Program opracowany na podstawie zarejestrowanych obciążeń eksploatacyjnych umożliwi ocenę eksploatacyjnej trwałości.

5. Bibliografia

- [1] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1997.
- [2] Żółtowski B., Niziński S.: Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. Bydgoszcz: Wydawnictwo Markar-Bz, 2002.
- [3] Rogacki R., Wasieczko P., Szczepaniak M.: Wieloczynnościowy agregat do sadzenia ziemniaków. Zadanie 6: Budowa komputerowego modelu obliczeniowego z uwzględnieniem modułów opisu topologicznego. Niepublikowane opracowanie wewnętrzne, Poznań: Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, 2011.
- [4] Szabatn J.: Podstawy teorii sygnałów. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2003.
- [5] Bendat J. S., Piersol A. G.: Metody analizy i pomiarów sygnałów losowych. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.
- [6] Rogacki R., Mac J., Pawłowski T., Wojciechowski J., Szczepaniak M.: Wieloczynnościowy agregat do sadzenia ziemniaków. Zadanie 20: Badania eksperymentalne agregatu do sadzenia ziemniaków (identyfikacja sił, naprężeń, słabych ogniw) w aspekcie weryfikacji modeli obliczeniowych. Niepublikowane opracowanie wewnętrzne. Poznań: Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, 2011.
- [7] Osiecki J. W., Gromadowski T., Stępiński B.: Badania pojazdów samochodowych i ich zespołów na symulacyjnych stanowiskach badawczych. Warszawa: Wydawnictwo Przemysłowego Instytutu Motoryzacji, 2006.
- [8] Kromulski J., Pawłowski T., Szczepaniak J.: Eksperymentalna identyfikacja parametrów modalnych niestacjonarnych układów mechanicznych z zastosowaniem eksploatacyjnej analizy modalnej. Modelowanie Inżynierskie, Politechnika Śląska, Tom 1, nr 32, 2006.