

A NEW METHOD FOR IDENTIFICATION OF UNCORRELATED FORCES ACTING IN THE AGRICULTURAL MACHINES

Summary

Knowledge of the operational loads is very useful in diagnostic process of mechanical structures and to simulate the response under working condition. In many cases, dynamic forces are not directly measurable and need to be identified using inverse solution method. In the present work presented are methods of identification of uncorrelated operational forces based on orthogonal decomposition of response PSD matrix. In this purpose were used methods based on eigen- and singular value decomposition of response PSD matrix and new method based on regularization. Except methods in frequency domain were used methods in time domain (ICA - Independent Component Analysis) for identification statistically independent and principal component. The method was used to identify the number of sources of the exciting forces acting during the work of a real mechanical system – machine for compostable organic materials processing.

NOWE METODY IDENTYFIKACJI NIESKORELOWANYCH SIŁ WYMUSZAJĄCYCH W MASZYNACH ROLNICZYCH

Streszczenie

Znajomość obciążeń eksploatacyjnych odgrywa kluczową rolę w procesie projektowania oraz badania własności dynamicznych konstrukcji. W wielu przypadkach bezpośredni pomiar sił dynamicznych jest niemożliwy i trzeba stosować odwrotne metody identyfikacji. W artykule przedstawiono możliwości identyfikacji liczby nieskorelowanych sił wymuszających z zastosowaniem metod rozkładów ortogonalnych macierzy wzajemnych gęstości widmowych mocy. Stosowano w tym celu dotychczas używane w PIMR metody rozkładu macierzy względem wartości własnych i szczególnych oraz nowe metody oparte na regularyzacji. Oprócz metod widmowych zastosowano metody czasowe identyfikacji składowych głównych i niezależnych z sygnału oparte o metody ICA (Independent Component Analysis). Metodę zastosowano do identyfikacji liczby nieskorelowanych sił wymuszających działających w czasie pracy rzeczywistego układu mechanicznego – kombajnu do materiałów organicznych.

1. Wprowadzenie

Znajomość obciążeń eksploatacyjnych odgrywa kluczową rolę w procesie projektowania oraz badania własności dynamicznych konstrukcji. Odpowiedź układu na wymuszenie jest zależna od wielkości sił wymuszających i charakterystyk dynamicznych układu. Znajomość sił eksploatacyjnych jest użyteczna dla potrzeb diagnostyki układów mechanicznych i symulacji odpowiedzi dynamicznych w warunkach eksploatacyjnych. Badania symulacyjne modeli numerycznych konstrukcji wymaga spełnienia warunków:

- zgodności modelu i obiektu (poprzez dostrojenie modelu),
- identycznych warunków brzegowych i obciążenia modelu i obiektu (wymagana identyfikacja obciążeń).

W wielu przypadkach bezpośredni pomiar sił dynamicznych jest niemożliwy i trzeba stosować odwrotne metody identyfikacji. W przypadku układu o znanych parametrach przydatne są metody pośredniej estymacji obciążeń na podstawie zmierzonych odpowiedzi. W literaturze tego typu podejście nazywane jest zadaniem odwrotnym identyfikacji.

Identyfikacja obciążeń eksploatacyjnych (sił wymuszających) powinna pozwalać na:

- określenie ile sił wymuszających działa w układzie,
- identyfikację punktów przyłożenia sił wymuszających,

- wyznaczenie amplitud sił wymuszających (w dziedzinie czasu i widma).

W artykule przedstawiono metody pozwalające na określenie ile sił wymuszających działa w układzie. Przedstawione metody realizowane są w dziedzinie czasu (analiza składowych głównych lub niezależnych) lub w dziedzinie widmowej (rozkłady ortogonalne macierzy gęstości widmowych mocy odpowiedzi na wymuszenie eksploatacyjne).

2. Opis układ w dziedzinie częstotliwości

Zależność pomiędzy wymuszeniem $x(t)$ i odpowiedzią $y(t)$ układu liniowego (systemu mechanicznego) można zapisać za pomocą zależności [3]:

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (1)$$

gdzie:

$G_{yy}(\omega)$ - macierz gęstości widmowych odpowiedzi,

$G_{xx}(\omega)$ - macierz gęstości widmowych wymuszenia,

$H(\omega)$ - macierz charakterystyk dynamicznych układu (FRF).

Wprowadzając współrzędne modalne $q(t)$ można dokonać transformacji podobieństwa do współrzędnych:

$$y(t) = [\Phi]q(t)$$

Przekształcając wyrażenie na macierz korelacji odpowiedzi dostajemy:

$$[C_{yy}(\tau)] = e\{y(t+\tau)y(t)^T\} = e\{[\Phi]q(t+\tau)q(t)^H[\Phi]^H\} = [\Phi][C_{qq}(\tau)][\Phi]^H$$

po zastosowaniu transformaty Fouriera dostajemy [2]:

$$[G_{yy}(\omega)] = [\Phi][G_{qq}(\omega)][\Phi]^H \quad (2)$$

gdzie $[G_{qq}(\omega)]$ macierz widmowa współrzędnych modalnych.

Przy założeniu, że kolumny macierzy Φ są względem siebie ortogonalne (unitarne) macierz $[G_{qq}(\omega)]$ jest macierzą diagonalną zawierającą wartości szczególne macierzy $G_{yy}(\omega)$.

3. Analiza składowych głównych i niezależnych

Analiza składowych niezależnych (Independent Component Analysis - ICA) to metoda separowania N statystycznie niezależnych sygnałów wejściowych, które zostały liniowo przemieszane w M sygnałów wyjściowych [3].

Algorytm ICA wymaga spełnienia następujących warunków: źródła muszą być niezależne, opóźnienia powodowane przez proces mieszający mogą być zanedbywane, niezależnych źródeł powinno być mniej niż sygnałów wyjściowych.

Założmy, że mamy M zmiennych losowych v_1, v_2, \dots, v_M (odpowiedzi na wymuszenie) będących kombinacjami liniowymi N niezależnych czynników s_1, s_2, \dots, s_N (siły wymuszające).

Algorytm ICA pozwala wyizolować składowe statystycznie niezależne. Celem algorytmu ICA jest obliczenie macierzy W , która spełnia warunek:

$$s \approx Wv \quad (3)$$

Rozkład obserwowanych sygnałów na statystycznie niezależne składowe bez żadnej dodatkowej wiedzy np. o apriorycznym rozkładzie prawdopodobieństw, nazywamy „ślepa separacją” (blind source separation, BSS).

ICA wymaga jako wstępnego kroku obróbki sygnałów tzw. wybielania lub sferowania danych. Jest to analiza składowych głównych. Liczba składowych niezależnych może być oceniana na podstawie liczby składowych głównych, dla których wartości własne macierzy kowariancji przyjmują największe wartości.

4. Wartości własne oraz wartości szczególne macierzy

Twierdzenia o rozkładzie macierzy względem wartości własnych i szczególnych stanowią podstawowe twierdzenia nowoczesnej algebry liniowej.

4.1 Rozkład macierzy względem wartości własnych

Dla każdej macierzy zespolonej symetrycznej A istnieje macierz unitarna U spełniająca zależność [4]:

$$U^T A U = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in R^{n,n} \quad (4)$$

przy czym $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ są wartościami własnymi macierzy A .

Z twierdzenia można wyprowadzić zależność:

$$A = U \Lambda U^H \quad (5)$$

Korzystając z powyższych zależności rozkład macierzy wzajemnych widm mocy względem wartości własnych można zapisać następująco:

$$[G_{N \times N}(\omega)] = [U_{N \times N}(\omega)] [\Lambda_{N \times N}(\omega)] [U_{N \times N}(\omega)]^H \quad (6)$$

Równania (7) i (1) mają podobny charakter. Uzyskane wartości własne $[\Lambda_{N \times N}(\omega)]$ macierzy $[G_{N \times N}(\omega)]$ można traktować jako dominujące widma własne. Są one nieskorelowane (widmo wzajemne wynosi zero).

Dominujące widma własne przedstawione w formie graficznej informują nas o rzędzie macierzy wzajemnych widm mocy oraz wskazują liczbę niekoherentnych źródeł drgań mechanicznych występujących dla poszczególnych częstotliwości.

4.2 Rozkład macierzy względem wartości szczególnych

Dla każdej zespolonej macierzy A istnieją takie macierze unitarne U, V , że spełniony jest warunek [4]:

$$U^H A V = \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_l) \quad (7)$$

gdzie $l = \min(m, n)$,

oraz przy $r = \text{rank}(A)$ $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$, $\sigma_{r+1} = \dots = \sigma_l = 0$

Liczby $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r, \sigma_l$ są określone przez A jednoznacznie i nazywają się wartościami szczególnymi macierzy A .

$$A = U \Sigma V^H \quad (8)$$

Kolumny $[v_1, v_2, \dots, v_n]$ macierzy V i $[u_1, u_2, \dots, u_m]$ macierzy U nazywamy niekiedy wektorami szczególnymi (prawymi lub lewymi) macierzy A .

Wartości szczególne macierzy A są rzeczywiste.

Rozkład macierzy względem wartości szczególnych jest często nazywany rozkładem SVD (od singular value decomposition - nazwy rozkładu w języku angielskim).

Rozkład macierzy wzajemnych widm mocy względem wartości szczególnych można przedstawić w postaci:

$$[G_{M \times N}(\omega)] = [U_{M \times M}(\omega)] [\Sigma_{M \times N}(\omega)] [V_{N \times N}(\omega)]^H \quad (9)$$

Metoda ta pozwala wnioskować w podobny sposób jak metoda rozkładu macierzy względem wartości szczególnych o liczbie źródeł sił wymuszających.

4.3 Rozkłady macierzy z zastosowaniem algorytmów zorientowanych na rozkład macierzy źle zdefiniowanych przy użyciu regularyzacji

Rozwiązanie zadania odwrotnego komplikuje fakt, że niewielkie błędy identyfikacji charakterystyk dynamicznych lub mierzonych odpowiedzi mogą mieć znaczący wpływ na dokładność estymowanych parametrów wymuszenia (jest to tzw. zagadnienie źle uwarunkowane – ang. *ill-posed problem*). Do rozwiązania zagadnień źle uwarunkowanych lub nieokreślonego rzędu (*rank-deficient*) można

stosować metody regularyzacji. Są to nowoczesne metody rozwiązywania liniowych zagadnień odwrotnych stosowane w dziedzinach przetwarzania sygnałów akustycznych, analizy obrazów w medycynie, tomografii, astronomii. Są to metody stabilne, efektywne i dające poprawne wyniki.

5. Identyfikacja eksploatacyjnych sił wymuszających działających w kombajnie do materiałów organicznych

Analizę składowych niezależnych działających w układzie przeprowadzono za pomocą oprogramowania FastICA. Jest to program darmowy (licencja GPL) będący przybornikiem do MATLABa.

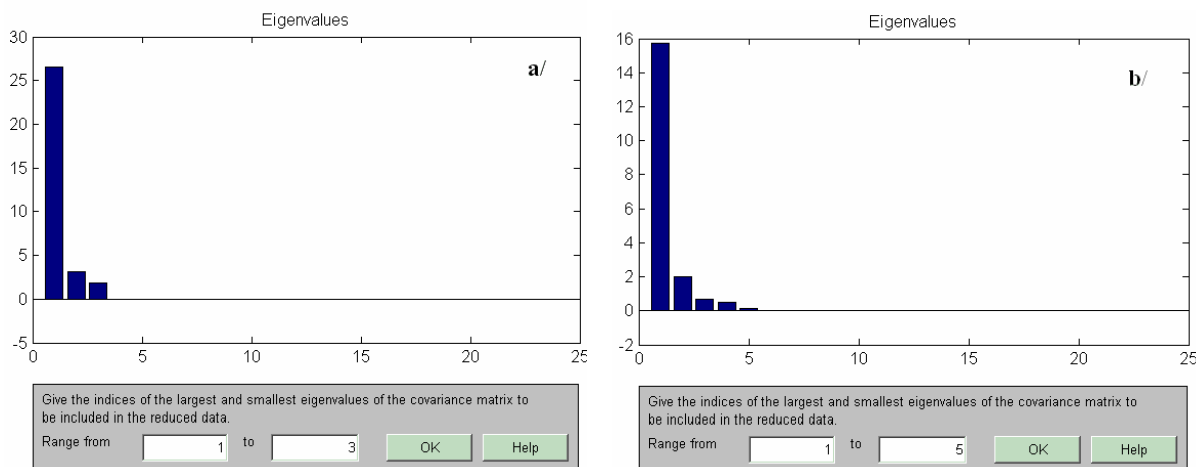
Metoda została zastosowana do określenia liczby składowych niezależnych, występujących podczas pracy na biegu jałowym kombajnu do materiałów organicznych dla następujących warunków pracy [5]:

- pracuje tylko silnik spalinowy,
- pracuje silnik spalinowy i przenośniki,
- pracują wszystkie mechanizmy kombajnu.



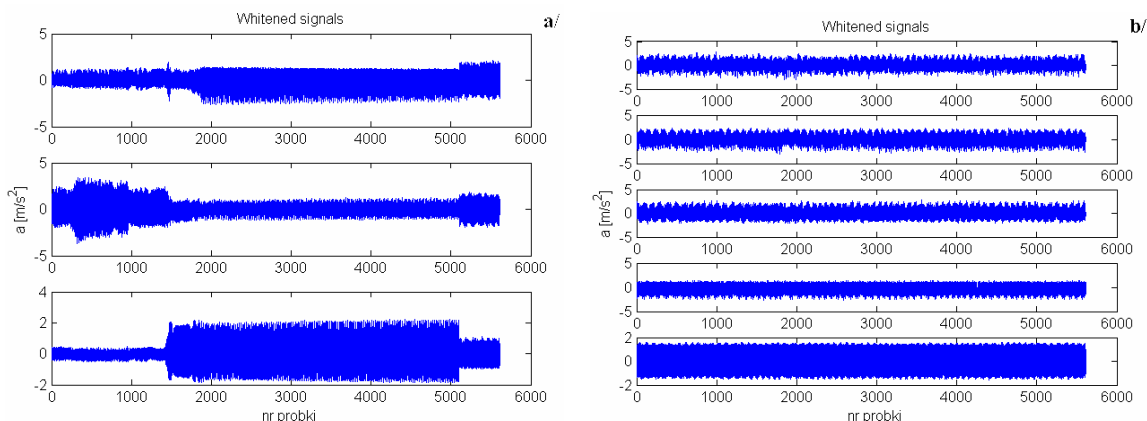
Rys. 1. Kombajn do materiałów organicznych
Fig. 1. Machine for compostable organic materials processing

Danymi wejściowymi do systemu były sygnały przyspieszeń drgań mechanicznych wyznaczone jednocześnie w siedmiu punktach układu. Do zbierania danych zastosowano wielokanałowy układ zbierania danych firmy HBM (zestaw oparty na układach SPIDER 8). Przykładowe wyniki identyfikacji składowych głównych niezależnych zamieszczono na rys. 2-4 [3].



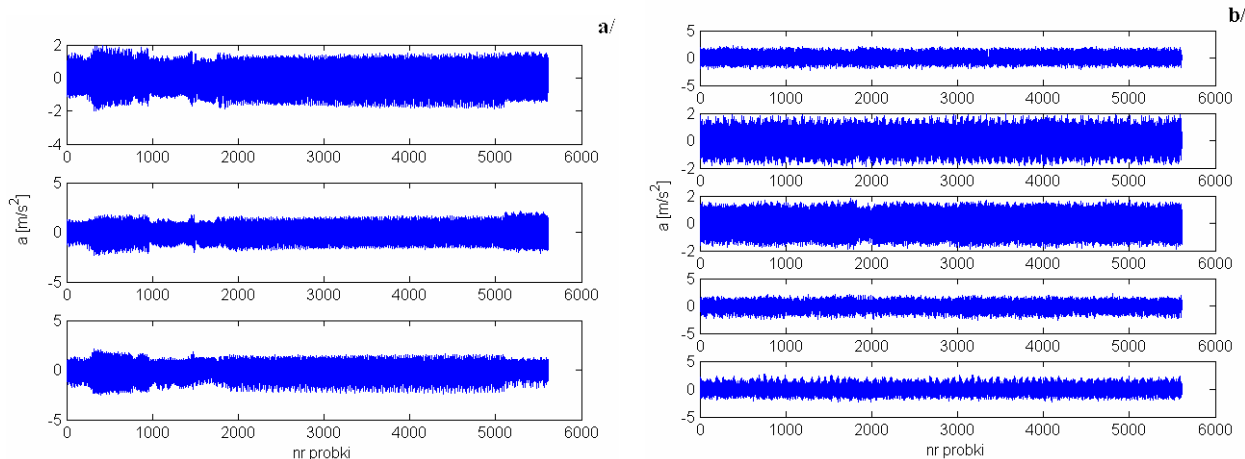
Rys. 2. Rząd modelu wyznaczony z programu ICA analizy składowych niezależnych:
a/ pracuje tylko silnik spalinowy, b/ pracują wszystkie mechanizmy kombajnu

Fig. 2. Rank of model computed from ICA procedures:
a/ exhaust engine works only, b/ all mechanisms of combine work



Rys. 3. Składowe główne (po wybieleniu) wyznaczone z programu ICA analizy składowych niezależnych:
a/ pracuje tylko silnik spalinowy, b/ pracują wszystkie mechanizmy kombajnu

Fig. 3. Principal components (whitened signals) computed from ICA procedures:
a/ exhaust engine works only, b/ all mechanisms of combine work



Rys. 4. Składowe niezależne wyznaczone z programu ICA analizy składowych niezależnych:
a/ pracuje tylko silnik spalinowy, b/ pracują wszystkie mechanizmy kombajnu

Fig. 4. Independent components computed from ICA procedures:
a/ exhaust engine works only, b/ all mechanisms of combine work

Podczas pracy kombajnu do materiałów organicznych na biegu jałowym gdy pracuje tylko silnik spalinowy lub silnik spalinowy i przenośniki rząd modelu wynosi 3. Podczas gdy pracują wszystkie mechanizmy kombajnu rząd modelu wynosi 5.

Liczba składowych głównych i niezależnych wyznaczona przez program odpowiada rządowi modelu.

Identyfikację liczby nieskorelowanych sił wymuszających działających w układzie można przeprowadzić stosując metodę [4]:

- rozkładu na wartości własne macierzy wzajemnych widm mocy (gęstości mocy) odpowiedzi układu,
- rozkładu na wartości szczególne macierzy wzajemnych widm mocy (gęstości mocy) odpowiedzi układu,
- rozkładu na wartości szczególne macierzy widm własnych mocy (gęstości mocy) odpowiedzi układu.

W artykule przedstawiono przykłady identyfikacji liczby nieskorelowanych sił wymuszających z wykorzystaniem standardowych procedur środowiska Matlab (rozkład na wartości własne i szczególne) oraz opisanych wyżej procedur rozkładu macierzy źle uwarunkowanych z użyciem regularyzacji. Do obliczeń zastosowano procedury zawarte w toolboxie UTV Tools opracowanym przez R. D. Fierro (California State University San Marcos) oraz P.C. Hansena i P.S.K. Hansena (Technical University of Denmark) [1]. Do wyznaczenia rozkładu macierzy wzajemnych gęstości widmowych mocy zastosowano następujące algorytmy z użyciem regularyzacji: hulv, hulv_a, hurv, hurv_a, hrrqr, lrrqr oraz lulv [1, 3].

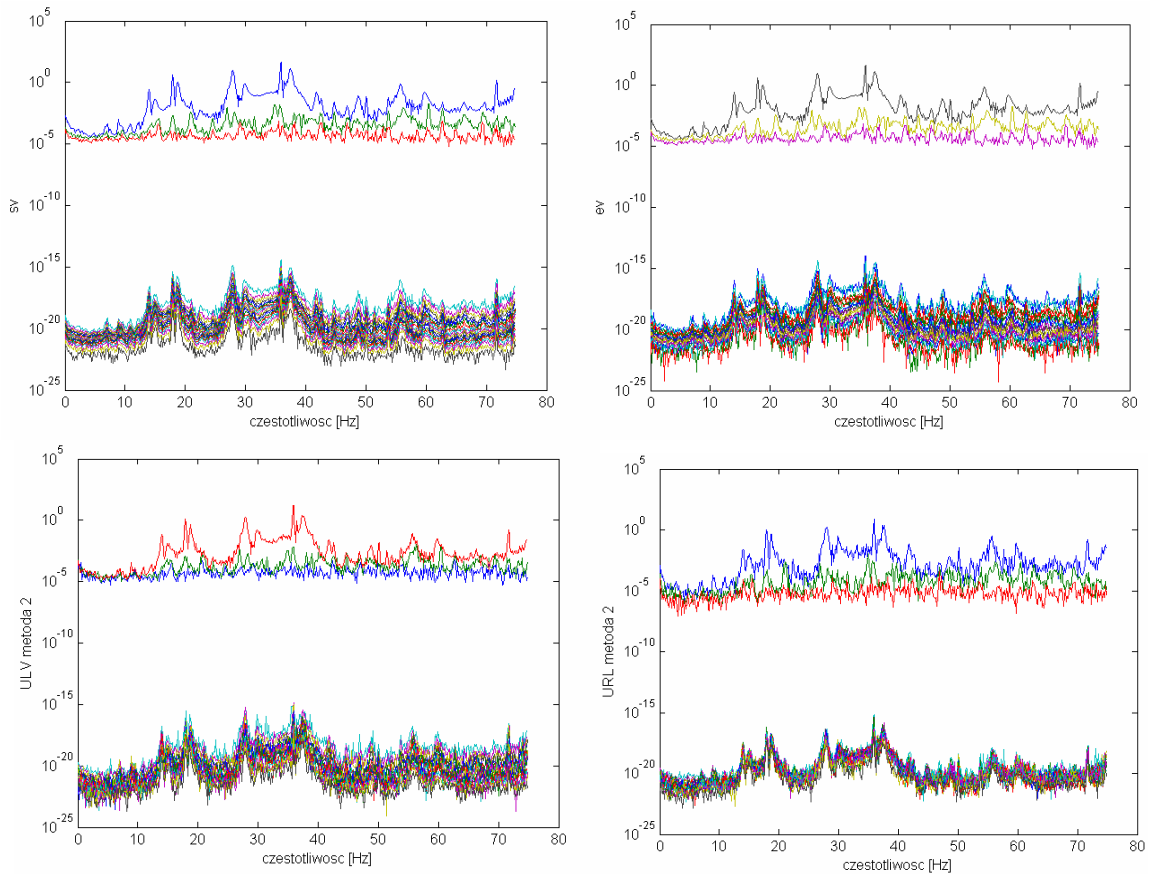
Danymi wejściowymi do systemu było 21 sygnałów pomiarowych, pochodzących z 7 czujników drgań rozmieszczonych na kombajnie (te same sygnały użyto do wyznaczenia składowych głównych i niezależnych). Przykładowe rozkłady zamieszczono na rys. 5-6.

Analizując zamieszczone widma można stwierdzić, że [3]:

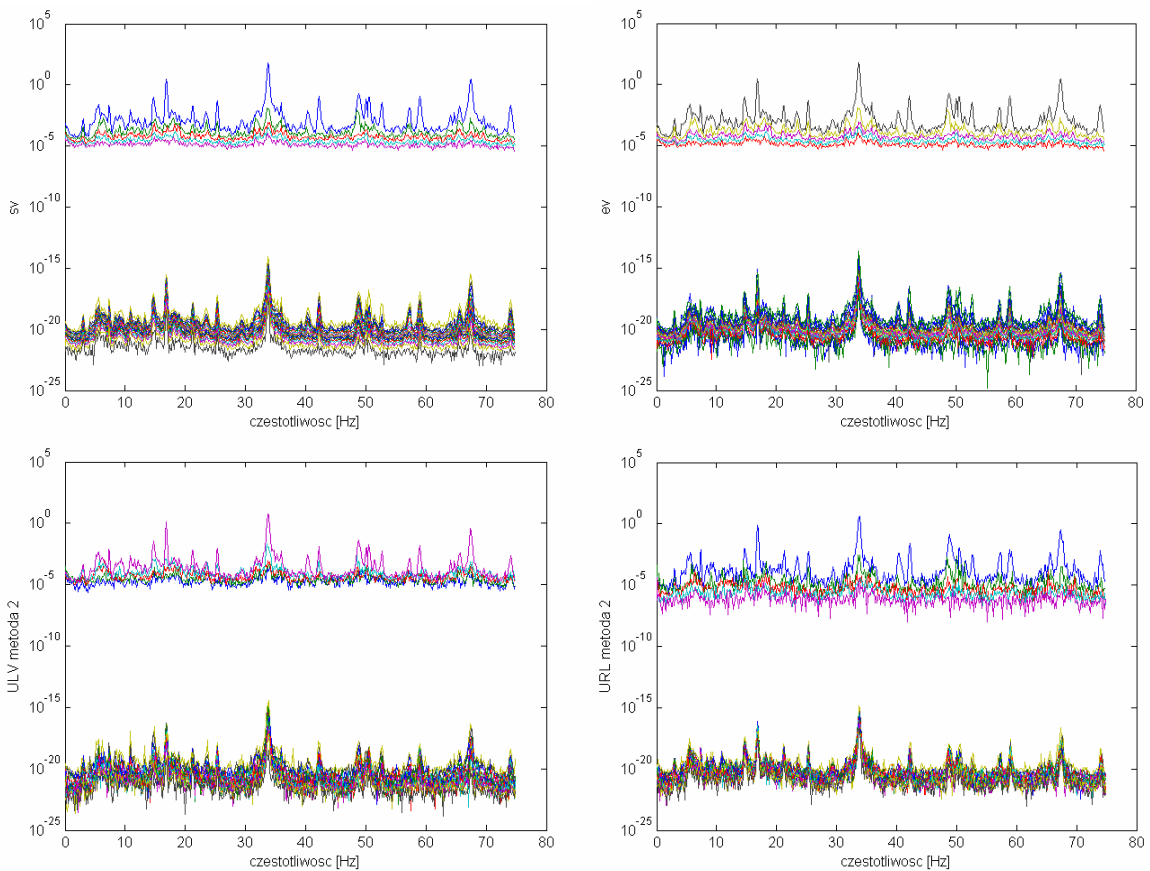
- w przypadku gdy pracuje tylko silnik spalinowy lub silnik spalinowy i przenośniki w układzie działają 3 nieskorelowane siły wymuszające,
- podczas pracy wszystkich mechanizmów kombajnu w układzie działa 5 nieskorelowanych sił wymuszających.

Wnioski

1. Metody rozkładów ortogonalnych na wartości własne lub szczególne macierzy wzajemnych widm gęstości mocy pozwalają na poprawną identyfikację liczby nieskorelowanych sił wymuszających.
2. Przydatna do identyfikacji liczby nieskorelowanych sił wymuszających działających w układzie jest metoda ICA pozwalająca na separację składowych głównych i niezależnych z sygnałów.
3. Należy rozwijać metody identyfikacji sił wymuszających tak by pozwoliły nie tylko określić liczbę niezależnych sił wymuszających ale także zidentyfikować ich punkty przyłożenia. Przydatne do tego mogą być metody analizy składowych głównych i niezależnych.



Rys. 5. Widma rozkładu na wartości własne i szczególne macierzy wzajemnych gęstości widmowych mocy przyspieszeń drgań mechanicznych maszyny w przypadku gdy pracuje tylko silnik spalinowy
Fig. 5. Singular and eigenspectra of PSD response matrices in case when exhaust engine works only



Rys. 6. Widma rozkładu na wartości własne i szczególne macierzy wzajemnych gęstości widmowych mocy przyspieszeń drgań mechanicznych maszyny w przypadku gdy pracują wszystkie mechanizmy kombajnu
Fig. 6. Singular and eigenspectra of PSD response matrices in case when all mechanisms of combine work

Literatura

- [1] Dossing O.: Structural Stroboscopy - Measurement of Operational Deflection Shapes, Application Notes. Brüel & Kjaer
- [2] Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN Warszawa, 1990
- [3] Kromulski J., Grzechowiak R.: Nowe metody diagnozowania stanu technicznego maszyn rolniczych z zastosowaniem analizy modalnej et. 1. Opracowanie nowej metody identyfikacji nieskorelowanych sił wymuszających działających w maszynie. PIMR Poznań, 2005
- [4] Kromulski J.: Badanie charakterystyk dynamicznych drgań źródeł akustycznych o złożonej strukturze mechanicznej metodą analizy modalnej. Praca doktorska, UAM Poznań, Wydział Fizyki, 1998
- [5] Kromulski J.: Identification of uncorrelated sources of exciting forces by means of the methods of crosspower spectrum matrix decomposition into singular values and eigenvalues, Archives of Acoustics 2/1998.