

## MODELOWANIE SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH GENEROWANYCH PRZEZ PRZEKŁADNIE PLANETARNE W WARUNKACH ZMIENNEGO OBCIĄŻENIA

Radosław ZIMROZ

Badawcze Laboratorium Diagnostyki i Wibroakustyki, Instytutu Górnictwa, Politechnika Wrocławska,  
Plac Teatralny 2, 50-051 Wrocław, [radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl](mailto:radoslaw.zimroz@pwr.wroc.pl)

### Streszczenie

W pracy przedstawiono uproszczony model sygnału generowanego przez przekładnie planetarną pracującą w warunkach zmiennego obciążenia. Model bazuje na zjawiskach modulacji: amplitudowej (której przyczyną jest okresowa zmienność obciążenia a także nieprawidłowa praca jarzma) oraz modulacji częstotliwościowej (spowodowanej cyklicznymi zmianami obciążenia, a co za tym idzie zmianami prędkości obrotowej na wejściu przekładni). Zastosowanie modelu pozwala na identyfikację struktury częstotliwościowej, testowanie procedury normalizacyjnej zaproponowanej przez Standera oraz ocenę przydatności analiz sygnałowych stosowanych na potrzeby diagnozowania przekładni planetarnej.

Słowa kluczowe: diagnostyka przekładni planetarnych, zmienne obciążenia, symulacje.

### MODELLING OF VIBRATION SIGNALS GENERATED BY PLANETARY GEARBOX UNDER TIME VARYING LOAD CONDITIONS

#### Summary

A model of signal generated by planetary gearbox working under time varying load conditions is presented. Model based on modulation phenomena. Both, amplitude and frequency modulation is considered. AM modulation is related to time varying load condition and improper arm behaviour and FM is connected to variation of load that causes variation of rotational speed on the input of planetary gearbox. Proposed model can be used for identification of frequency structure of signal testing normalization procedure proposed by Stander and assessment of signal processing techniques that are using for diagnostics purposes.

Keywords: planetary gearbox diagnostics, time-varying load, simulations.

## 1. WPROWADZENIE

Dotychczasowe badania realizowane przez autora dotyczące diagnozowania wielostopniowej przekładni zębatej ze stopniem planetarnym pracującej w warunkach zmiennego obciążenia pokazują konieczność wspomaganie procesu diagnozowania symulacjami z wykorzystaniem modelu. Szeroki zakres zmienności parametrów sygnału (wpływ zmiennego obciążenia na amplitudę sygnału i wpływ zmiennej prędkości obrotowej na strukturę częstotliwościową sygnału oraz związane z nimi modulacje amplitudowa i częstotliwościowa), duży wpływ zakłóceń, mała powtarzalność eksperymentu biernego i przede wszystkim jego koszty powodują, że dobór odpowiednich metod przetwarzania sygnału, optymalizacji procesu przetwarzania sygnału powinien zostać poprzedzony gruntownym zrozumieniem zjawisk zachodzących w czasie eksperymentu na obiekcie rzeczywistym. Zaproponowane podejście modelowe w diagnostyce jest bardzo często stosowane – zwłaszcza w diagnostyce przekładni. Symulacje

z wykorzystaniem nawet bardzo uproszczonego jakościowego modelu przeprowadzone przez autora pozwoliły scharakteryzować sygnały diagnostyczne i dokonać wyboru metod przetwarzania tych sygnałów [2, 3].

Jak podano w pracy [4] wyróżnia się następujące klasy modeli:

- modele abstrakcyjne
- modele kinematyczne
- modele dynamiczne

Zbudowanie pełnego modelu kinematycznego czy dynamicznego dla tak złożonej struktury jest zadaniem skomplikowanym z naukowego i organizacyjnego punktu widzenia. Niezbędna jest pełna dokumentacja techniczna w celu wyznaczenia podstawowych parametrów modelu jak i bezwładności elementów wirujących, parametrów ząbkowania (sztywności, błędy, tłumienia) itd., a pozyskanie jej niestety jest często bardzo utrudnione (pełna dokumentacja wykonawcza nie jest przekazywana nawet użytkownikom maszyn). Ze względu na oddziaływania zachodzące pomiędzy silnikiem, przekładnią i jej obciążeniem należałoby

potraktować problem systemowo. To z kolei prowadzi do bardzo dużej złożoności modelu.

W związku z tym zdecydowano się zbudować uproszczony model abstrakcyjny, który pozwala ocenić strukturę częstotliwościową sygnału i dokonać pewnych jakościowych analiz, co może pomóc w pozyskiwaniu cech diagnostycznych. Modele takie są powszechnie stosowane w ocenie przydatności nowych metod przetwarzania sygnałów na potrzeby diagnozowania przekładni [5].

Po wstępnej analizie sygnałów (zob. rozdz. 2) zarejestrowanych na maszynie, na potrzeby modelowania, przyjęto następujące założenia:

- a) model powinien uwzględniać zmienność obciążenia zewnętrznego
- b) model powinien uwzględniać zmienność prędkości obrotowej na wejściu przekładni związanej ze zmianami obciążenia
- c) model powinien obejmować nieprawidłową pracę jarzma

Ze względu na występujące w obiekcie zjawiska model sygnału generowanego przez przekładnię oparto na równaniu modulacji amplitudowej (punkt a) i c)) oraz częstotliwościowej (punkt b)).

## 2. WSTĘPNE ANALIZY SYGNAŁÓW RZECZYWISTYCH

Dla zarejestrowanych sygnałów drganiowych (w czasie normalnej eksploatacji) zastosowano powszechnie znane metody analizy takie jak analiza w dziedzinie czasu, analiza widmowa, analiza obwiedni/widmo obwiedni oraz analizy czasowo-częstotliwościowe (STFT). Wyniki tych analiz zostały częściowo zaprezentowane w pracach [2, 3, 6]. Przedstawione wybrane wyniki analiz zostały wyselekcjonowane tak, aby zobrazować problemy, które należy uwzględnić w procesie modelowania.

Na rys. 1 przedstawiono sygnał drganiowy z przekładni odfiltrowany wokół częstotliwości ząbienia (w zakresie  $\pm 0,5$  częstotliwości ząbienia) i jego widmo. Z rys. 1a) łatwo zauważyć głęboką modulację amplitudową sygnałem

o częstotliwości ok. 5Hz wywołaną nieprawidłową pracą jarzma (rys. 2).

Występowanie modulacji amplitudowej powinno umożliwić zidentyfikowanie wstęg bocznych wokół częstotliwości ząbienia. Na podstawie rys. 1b) identyfikacja taka jest niemożliwa.

Przyczynę takiej sytuacji wyjaśnia mapa czasowo-częstotliwościowa przedstawiona na rys. 3.

Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że częstotliwość nośna nie jest stała lecz charakteryzuje się okresową zmiennością. Okazało się, że cykl ten jest związany ze zmiennym obciążeniem wynikającym z charakteru pracy koła czerpakowego.

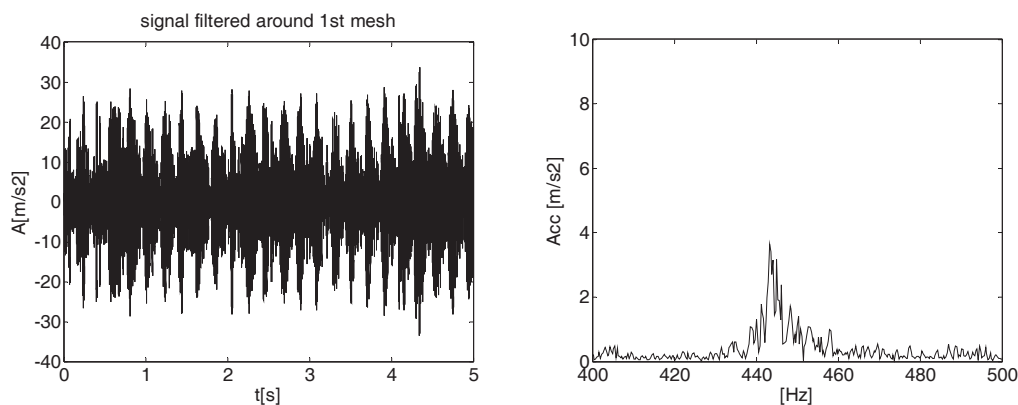
Na rys. 4 pokazano widma dla dwóch sygnałów zarejestrowanych dla różnych warunków eksploatacyjnych – rys. 4a przedstawia fragment widma z rozmytymi składowymi (efekt zmienności obciążenia), na rys. 4b identyfikacja częstotliwości nośnej i wstęg bocznych nie stanowi problemu.

Na rys. 5 pokazano wyniki demodulacji AM sygnału drganiowego wokół częstotliwości ząbienia (w tym przypadku wokół szóstej harmonicznej).

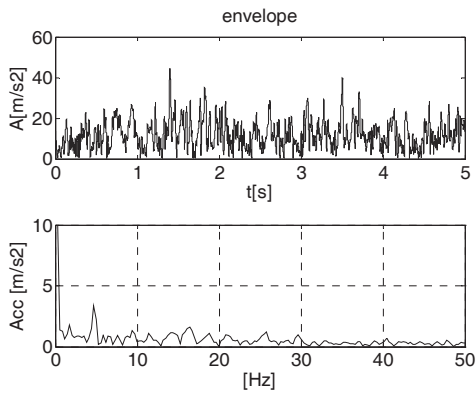
Rys. 5a przedstawia obwiednie zawierającą składowe pochodzące od nieprawidłowej pracy jarzma oraz od zmian obciążenia oraz widmo obwiedni natomiast rys. 5b przedstawia obwiednię sygnału odfiltrowanego - zawierającego informację tylko o obciążeniu.

Rys. 6 przedstawia mapę czasowo-częstotliwościową dla przekładni w nieprawidłowym stanie technicznym, dla której ze względu na nadmierny luz w węzłach łożyskowych występuje efekt zukosowania zależnego od wartości obciążenia.

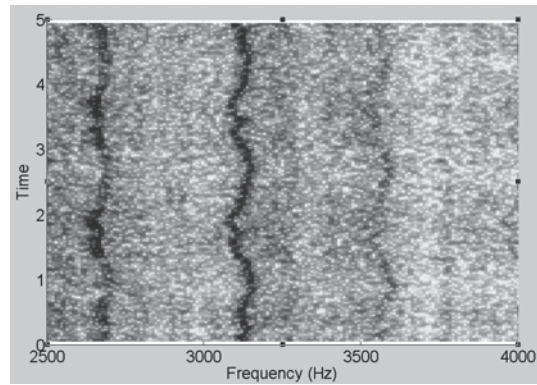
Na mapie tej można zidentyfikować 3 grupy pionowych linii oddalonych od siebie o ok. 1.8[s] co odpowiada cyklowi obciążenia ( $t=[\sim 1s, 2,6s, 4,2s]$ ). Szczegółowa analiza z wykorzystaniem widma Wignera (rys. 7) oraz analiza wolnozmiennnej części sygnału obwiedni pokazuje, że dla wzrastającego obciążenia gwałtownie wzrasta amplituda drugiej harmonicznej sygnału generowanego przez jarzmo.



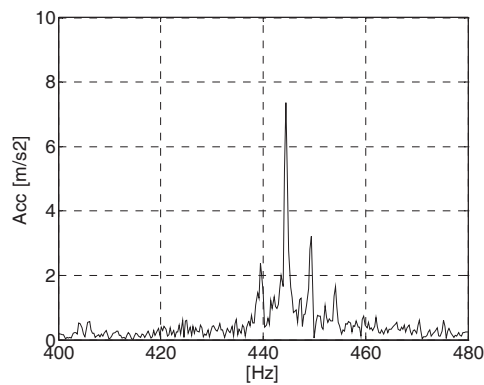
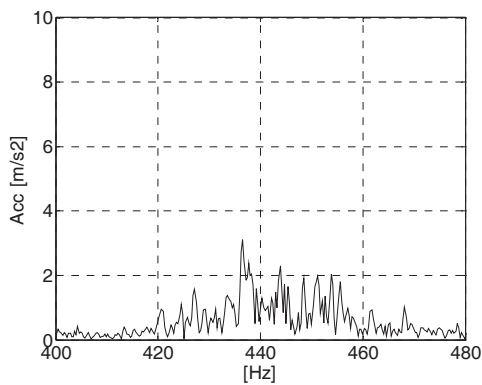
Rys. 1 a) Sygnał odfiltrowany ( $f_{ZAZĘBIENIA} \pm \Delta f$ ), b) fragment widma w tym zakresie częstotliwości



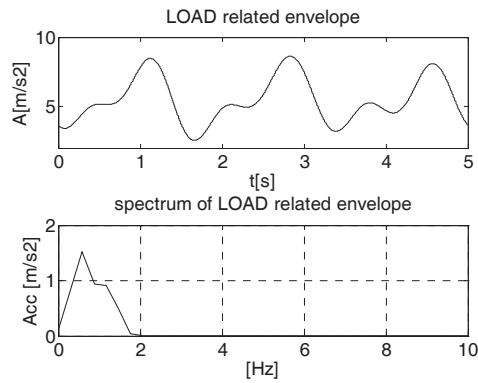
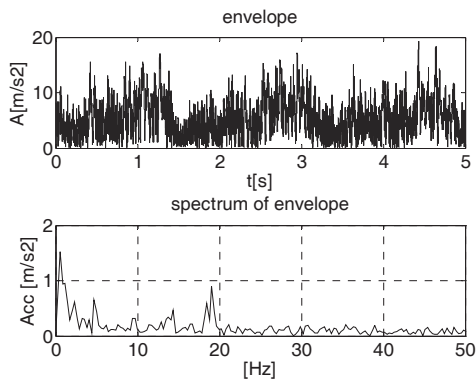
Rys. 2. Obwiednia i widmo obwiedni dla sygnału odfiltrowanego



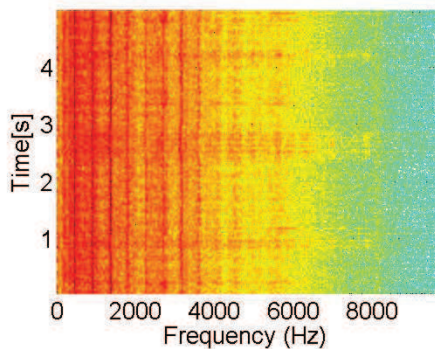
Rys. 3. Fragment mapy czasowo-częstotliwościowej



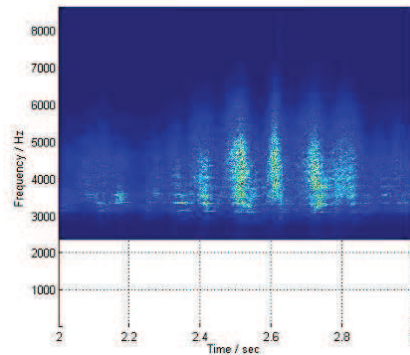
Rys. 4. Porównanie widm dla przekładni: a) fluktuacja prędkości i brak możliwości detekcji składowych b) brak fluktuacji – widoczne składowe częstotliwość ząbienia i wstęgi boczne



Rys. 5. Widmo obwiedni i odseparowana część obwiedni związana z obciążeniem (przekładnia 1 sygnał 3 harmoniczna 6)



Rys. 6. Mapa czasowo-częstotliwościowa (STFT) dla przekładni w nieodpowiednim stanie technicznym



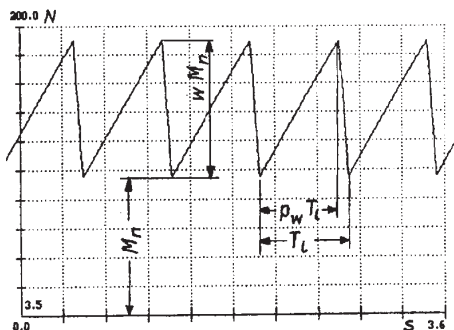
Rys. 7. Fragment mapy czasowo-częstotliwościowej (Wigner) wyznaczony dla czasu  $t=2:3[s]$

### 3. IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW EKSPLOATACYJNYCH I ZMIANY STANU ORAZ ICH WPŁYWU NA SYGNAŁ DRGANIOWY

Na postać drganiowego sygnału diagnostycznego wpływa wiele czynników. Bartelmus grupuje je następująco: czynniki konstrukcyjne, czynniki technologiczne, czynniki eksploatacyjne i zmiana stanu w czasie eksploatacji [7]. W tej części referatu zajmujemy się identyfikacją wpływu czynników eksploatacyjnych i zmiany stanu związanej z nieprawidłową pracą jarzma w przekładni planetarnej na postać sygnału.

#### 2.1. Teoretyczna zmienność obciążenia

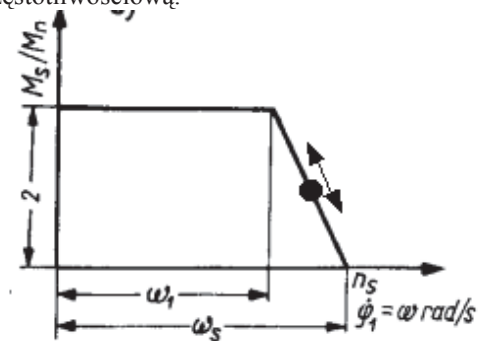
Na rys. 7a przedstawiono teoretyczny przebieg obciążenia zewnętrznego związanego z urabianiem przez koło czerpakowe (rys. 7b). Jest to model zaproponowany przez Bartelmusa [7] opracowany na potrzeby uwzględniania czynnika eksploatacyjnego w modelowaniu dynamiki układu napędowego z przekładnią w zastosowaniu do diagnostyki. Autorowi znany jest także bardziej zaawansowany model Szepietowskiego [8] ale na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano wykorzystać model Bartelmusa ze względu na łatwość zbudowania procedury opisującej zaproponowany kształt przebiegu.



Rys. 7. a) teoretyczny kształt zmian obciążenia [7]  
7b) widok koła czerpakowego

#### 2.2. Wpływ zmienności obciążenia na punkt pracy silnika

Zmiana obciążenia powoduje zmianę punktu pracy silnika (rys. 8). Przykładowo: wzrost obciążenia powoduje wzrost momentu obrotowego silnika i jednocześnie spadek prędkości obrotowej rotora silnika czyli spadek prędkości obrotowej na wejściu przekładni. Oznacza to zmianę częstotliwości wszystkich składowych zależnych od prędkości obrotowej (częstotliwości wałów, ząbów itd.). Jeśli zmienność obciążenia jest cykliczna powoduje to modulację częstotliwościową.



Rys. 8. Charakterystyka silnika [7]

#### 2.3. Wpływ nieprawidłowej pracy jarzma

Nieprawidłowa praca wału w przekładni zębatej powoduje wzrost amplitudy składowych o częstotliwościach  $f_w$ ,  $2f_w$ ,  $3f_w$  w zależności od rodzaju niesprawności [7].

Zatem w analizowanej przekładni planetarnej nieprawidłowa praca jarzma powinna powodować wzrost amplitud składowych o częstotliwości związanej z jarzmem (zwanej dalej częstotliwością jarzma). Zauważono, że dla wzrastającego obciążenia zewnętrznego nieprawidłowa praca jarzma manifestowana jest silniej przez wzrost amplitudy drugiej harmonicznej jarzma, która oznacza zwykle utratę osiowości lub luz w parach obrotowych [7]. Przyczyną korelacji pomiędzy wartością obciążenia a amplitudą tej składowej jest najprawdopodobniej zużycie łożysk (nadmierny luz).

### 4. MODELOWANIE SYGNAŁU DRGANIOWEGO

#### 4.1. Model matematyczny modulacji amplitudowej pochodzącej od zmiennego obciążenia

Wpływ zmiennego okresowego obciążenia na postać sygnału określił Randall [9]. Stwierdził on fakt występowania modulacji amplitudowej (AM) sygnału generowanego przez zazębienia spowodowanej zmiennymi ugięciami współpracujących zębów zależnymi od wartości

obciążenia zewnętrznego. Równanie modulacji AM opisane jest następująco:

$$S_{AM} = (1 + m \cdot s_m) \cdot S_n \quad (1)$$

gdzie  $m$  – współczynnik głębokości modulacji  
 $S_n$  - sygnał nośny (częstotliwość zazębienia) – ograniczono się do wykorzystania jednej harmonicznej opisanej jako:

$$S_n = A_{MESH(i)} \cdot \sin(2\pi f_{MESH(i)} t) \quad (2)$$

$s_m$  jest funkcją modulującą opisaną jako:

$$s_m = s_{LOAD} = A_{LOAD} \cdot \text{triangle}(2\pi f_{LOAD} t) \quad (3)$$

gdzie *triangle* jest wbudowana funkcją pakietu Matlab umożliwiającą generowanie przebiegów piłokształtnych o zadanej częstotliwości i wypełnieniu.

#### 4.2. Model matematyczny modulacji częstotliwościowej pochodzącej od zmiennego obciążenia

Równanie opisujące wpływ zmiennej prędkości obrotowej dla przekładni zębatej można zapisać:

$$S_{FM} = \sin(2\pi(f_{MESH(i)}(t)) \cdot t) \quad (4)$$

Równanie (4) oznacza, że częstotliwość zazębienia  $f_{MESH}$  będzie zmienna w czasie. Czynnikiem modulującym jest wyrażenie:

$$f_{MESH(i)}(t) = f_{MESH(i)} + m_f \cdot s_m(t) \quad (5)$$

uwzględniając że  $s_m(t)$  jest reprezentowany przez zmiany obciążenia otrzymujemy:

$$S_{FM} = \sin(2\pi f_{MESH(i)} \cdot t + m_f \cdot \text{triangle}(2\pi f_{LOAD}) \cdot t) \quad (6)$$

Należy dodać, że zmiany obciążenia powodujące opisany powyżej efekt zmienności częstotliwości zazębienia (modulacji częstotliwości) powodują również zmienność częstotliwości chwilowej związanej z jazdem. W modelowaniu wpływu zmienności obciążenia na postać sygnału ten efekt został pominięty.

#### 4.3. Model matematyczny modulacji amplitudowej wywołanej nieprawidłową pracą jarzma

Jak już wspomniano podczas wstępnych analiz sygnałów drganiowych zarejestrowanych na badanym obiekcie wykryto silną modulację amplitudową związaną z nieprawidłową pracą jarzma. Tego typu niesprawności modeluje się wykorzystując równanie modulacji amplitudowej:

$$S_{ARM} = A_{ARM} \cdot \sin(2\pi f_{ARM} t) \quad (7)$$

zauważono, że dla jednej z przekładni okresowo pojawia się dodatkowa składowa - druga harmoniczna częstotliwości jarzma. Stwierdzono silną zależność pomiędzy amplitudą tej składowej a wartością obciążenia. Sygnał generowany podczas pracy jarzma można opisać następująco:

$$S_{ARM} = A_{ARM1} \cdot \sin(2\pi f_{ARM} t) \quad (8)$$

$$\dots + A_{ARM2}(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \cdot f_{ARM} t)$$

gdzie  $A_{ARM1}$  oznacza amplitudę składowej o częstotliwości jarzma a  $A_{ARM2}$  oznacza amplitudę składowej o częstotliwości dwukrotnie większej.  $A_{ARM2}$ , która jest zależna od czasu – zależność tę można opisać ponownie wykorzystując równanie modulacji:

$$A_{ARM2}(t) = (1 + \text{triangle}(2\pi f_{LOAD} t)) \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \cdot f_{ARM} t) \quad (9)$$

#### 4.4. Kompleksowy model sygnału z uwzględnieniem eksploatacji w zmiennych warunkach i nieprawidłowej pracy jarzma

Model sygnału drganiowego z uwzględnieniem wpływu czynników: eksploatacyjnego (zmienne wartości chwilowe prędkości i obciążenia zewnętrznego) i zmiany stanu spowodowanej nieprawidłową pracą jarzma można zapisać jako:

$$S_{AM/FM} = (1 + A_{LOAD} \cdot \text{triangle}(2\pi f_{LOAD} t) + \dots + A_{ARM1} \cdot \sin(2\pi f_{ARM} t)) \quad (10)$$

$$\dots + A_{ARM2}(t) \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \cdot f_{ARM} t) \cdot \sin(2\pi(f_{MESH(i)} + \text{triangle}(2\pi f_{LOAD})) \cdot t)$$

### 5. WYNIKI SYMULACJI I ANALIZ

Na rys. 9a przedstawiono sygnał zmodulowany amplitudowo - sygnałem nośnym jest sygnał generowany przez zazębienie (tu jedna harmoniczna) a sygnałem modulującym jest wolnozmienny sygnał reprezentujący zmienność obciążenia (charakterystyczny piłokształtny przebieg związany z pracą organu urabiającego). Uwzględnienie nieprawidłowej pracy jarzma prowadzi do „podwójnej” modulacji amplitudowej gdzie czynnikiem (sygnałem) modulującym oprócz zmiennego obciążenia jest także sygnał sinusoidalny o częstotliwości jarzma (rys. 9b). Widmo sygnału zmodulowanego przedstawia rys 9b. Widoczne w widmie prążki to składowa związana z zazębieniem oraz wstęgi boczne – efekt modulacji pochodzącej od jarzma. Wstęgi boczne związane z modulacją pochodzącą od zmian obciążenia ( $f_{LOAD}=0.55\text{Hz}$ ) nie są widoczne ze względu na przyjętą rozdzielczość analizy widmowej.

Rozpatrywanie zmiennych warunków eksploatacyjnych jako zmienności ujemnie skorelowanych prędkości i momentu na charakterystyce silnika prowadzi do zastosowania jednocześnie modulacji amplitudy (AM) i częstotliwości (FM). Widmo tak wytworzonego sygnału jest rozmyte (rys. 10) i trudno jest zidentyfikować jakiegokolwiek składowe. Mapa czasowo-częstotliwościowa (STFT) wyraźnie pokazuje zmienność częstotliwości w cyklu obciążenia (por. rys. 10 b oraz rys. 3).

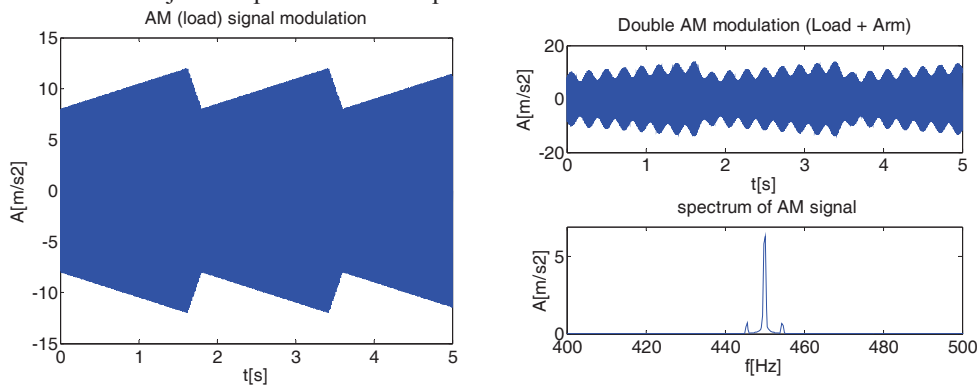
Ze względu na nienajlepszą rozdzielczość STFT (podstawowa wada tej analizy) zdecydowano przeprowadzić eksperyment symulacyjny dla dziesięciokrotnie większej wartości częstotliwości jarzma. Taki eksperyment pozornie jest nieuzasadniony ze względu na brak możliwości modyfikacji przekładni, jednakże pozwala na zrozumienie struktury częstotliwościowej sygnału i prowadzenie dalszych analiz, które jak to zostanie pokazane w następnym rozdziale, wyjaśniają problemy związane z separacją źródeł modulacji.

Rys. 11 przedstawia podwójną modulację AM ale dla nowej częstotliwości jarzma. Eksperyment wykonano dla przypadku bez modulacji FM (rys. 11a – widoczne wstęgi boczne, 11b - mapa czasowo częstotliwościowa zawiera poziome linie oznaczające częstotliwości stałe w czasie). Uwzględnienie modulacji FM pozwala na mapie

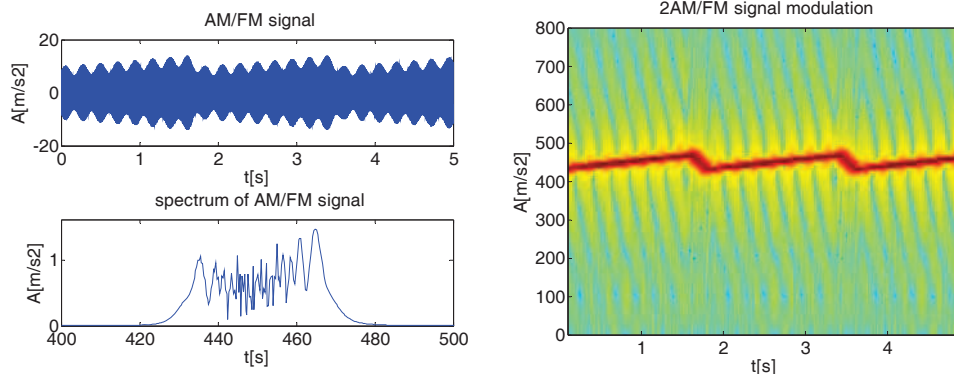
czasowo częstotliwościowej (rys. 12b) zauważyć, że nie tylko częstotliwość nośna zmienia się cyklicznie ale także częstotliwości wstęg bocznych – rys. 12b. Identyfikacja składowych odpowiadającym wstępom bocznym w widmie nie jest możliwa.

Na rys. 13 przedstawiono spektrogram sygnału modulującego modelujący nieprawidłową pracę jarzma. Sygnał modulujący zawiera składową o częstotliwości jarzma  $f_{JARZMA}$  o amplitudzie stałej w czasie oraz składową o częstotliwości dwukrotnie większej, której amplituda zależna jest od wartości chwilowego obciążenia

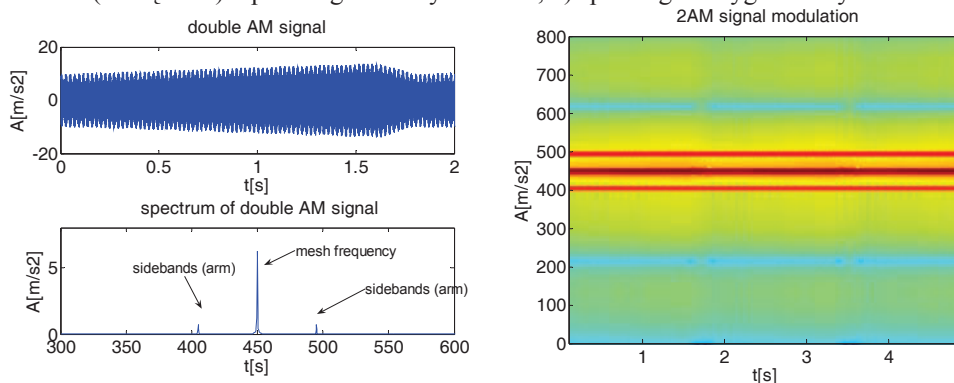
Rys. 13b przedstawia spektrogram sygnału zmodulowanego amplitudowo i częstotliwościowo z uwzględnieniem zmiennego obciążenia i nieprawidłowej pracy jarzma (wspomniane powyżej 2 składowe).



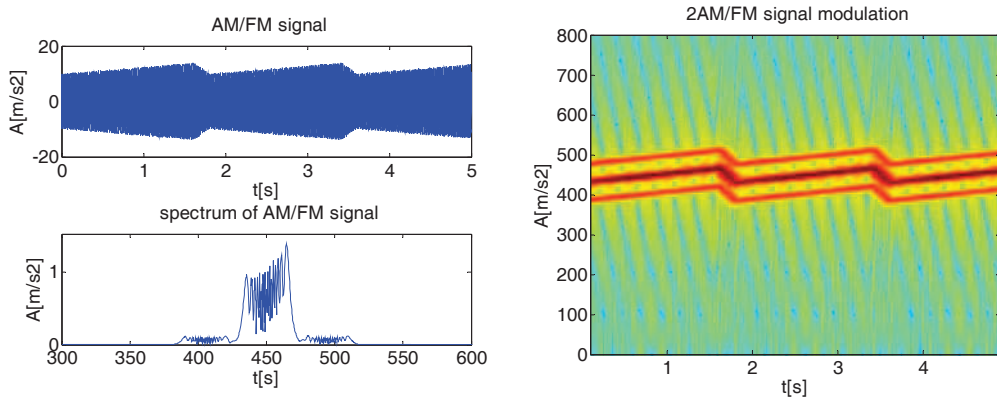
Rys. 9. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie) – przebieg czasowy  
b) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo  $f=4,5\text{Hz}$ ) – przebieg czasowy i widmo



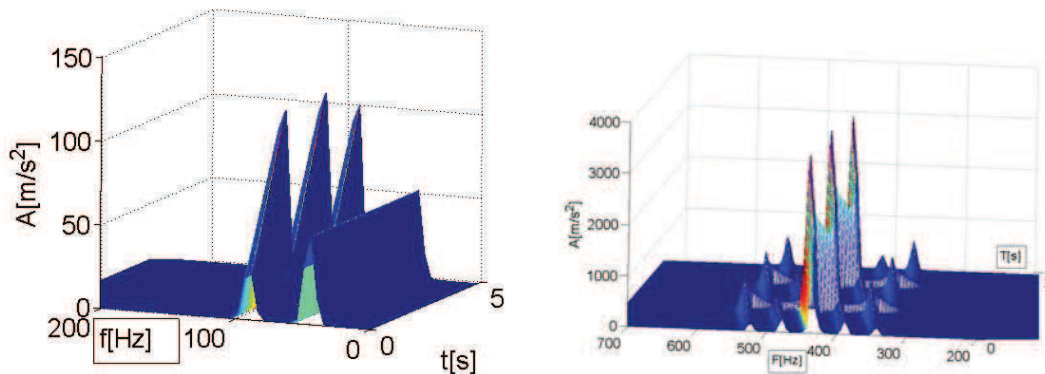
Rys. 10. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo  $f=4,5\text{Hz}$ ) i częstotliwościowo (obciążenie) – przebieg czasowy i widmo, b) spektrogram sygnału z rys. 10a



Rys. 11. Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo,  $f=45\text{Hz}$ ) – przebieg czasowy i widmo,  
b) Spektrogram sygnału z rys. 11a



Rys. 12. Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie + jarzmo  $f=45\text{Hz}$ ) i częstotliwościowo (obciążenie) – przebieg czasowy i widmo, b) Spektrogram sygnału z rys 12a

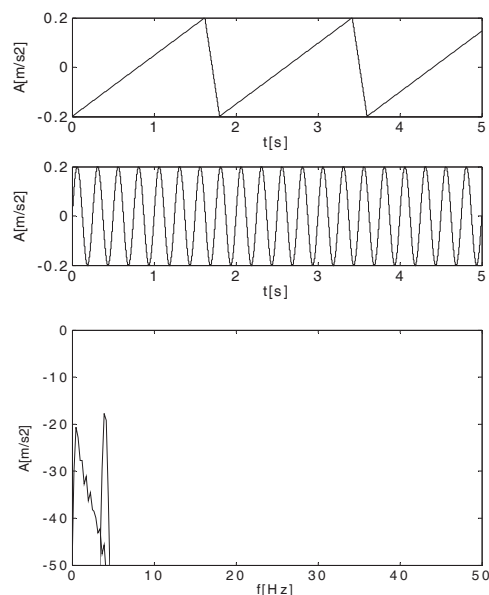


Rys. 13. Spektrogramy sygnałów a) modulującego z uwzględnieniem 2 harmonicznej jarzma  $f=45\text{Hz}$  b) zmodulowanego AM/FM z uwzględnieniem 2 harmonicznej jarzma

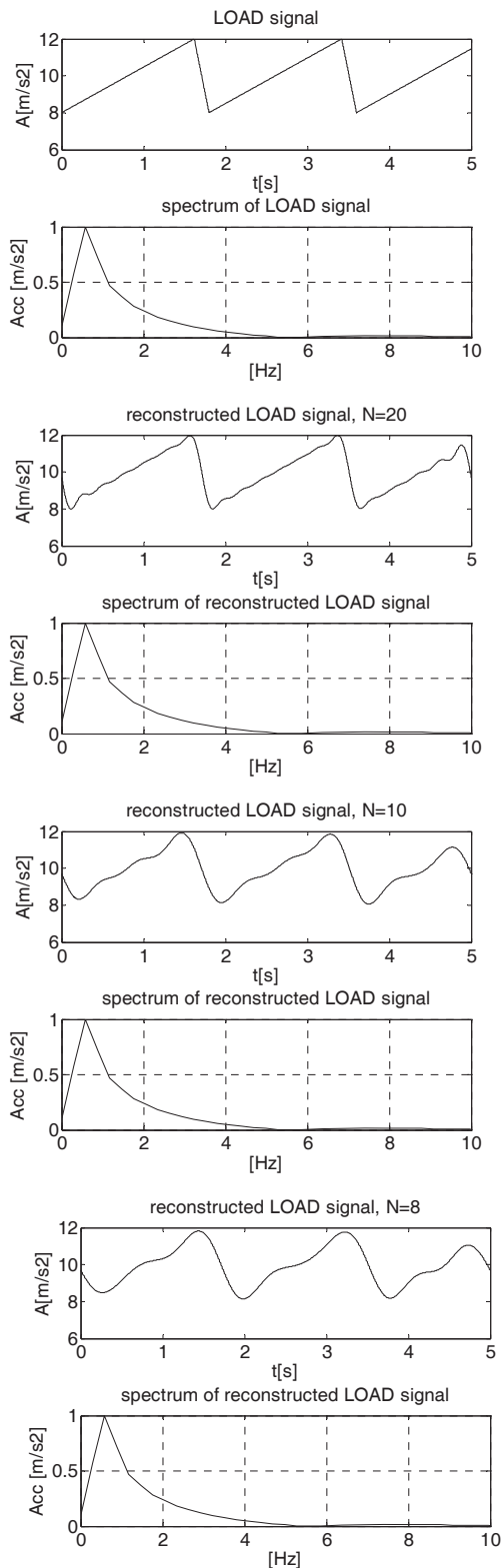
## 6. EKSTRAKCCJA INFORMACJI Z SYGNAŁU OBWIEDNI

W celu eliminacji wpływu zmiennego obciążenia na sygnał drganiowy postanowiono wykorzystać procedurę normalizacji zaproponowaną przez Standerę [1]. W celu wykorzystania tej metody należy wyodrębnić z sygnału drganiowego wolnozmienną, powiązaną ze zmianami obciążenia, część obwiedni. Ekstrakcja informacji z sygnału obwiedni (separacja źródeł modulacji) polega na zastosowaniu filtracji dolno przepustowej (do odseparowania sygnału związanego z obciążeniem) bądź górno przepustowej (do odseparowania sygnału związanego z nieprawidłową pracą jarzma) do sygnału obwiedni uzyskanej z demodulacji. Ze względu na niewielkie różnice w częstotliwości zmian obciążenia i pracy jarzma oraz charakter przebiegu zmian obciążenia (sygnał niesinusoidalny obejmuje pasmo o pewnej szerokości - zob. rys. 14b) podczas separacji nie jest możliwe wyekstrahowanie pełnej informacji dotyczącej obciążenia. Na rysunkach 15a-d przedstawiono wpływ liczby próbek użytych do filtracji z wykorzystaniem zerowania FFT. Czym większa liczba próbek w FFT użyta jest w procesie rekonstrukcji sygnału – tym lepiej rekonstruowany jest sygnał będący źródłem modulacji AM pochodzącej od zmian obciążenia.

Zdaniem autora między innymi tym faktem można tłumaczyć odstępstwa rzeczywistych sygnałów obwiedni od teoretycznych przebiegów obciążenia. Nie do pominięcia są również czynniki wynikające wprost ze sposobu prowadzenia eksploatacji górniczej (sterowania procesem urabiania).



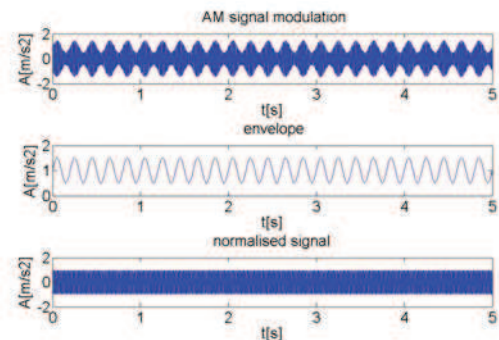
Rys. 14. Przebiegi czasowe stanowiące sygnały modulujące: zmiany obciążenia ( $0.55\text{Hz}$ ) i nieprawidłową pracę jarzma ( $4\text{Hz}$ ) i widmo sumy tych sygnałów



Rys. 15. Wpływ liczby próbek na postać rekonstruowanego sygnału obwiedni związanej z obciążeniem: a) 180 próbek – idealna rekonstrukcja, b) 20 próbek, c) 10 próbek, d) 8 próbek – wyraźne różnice w przebiegu sygnału w porównaniu z wzorcowym sygnałem

## 7. NORMALIZACJA

Koncepcje eliminacji wpływu zmiennego obciążenia na postać sygnału drganiowego zaproponowanej przez Standera [1] ilustruje rys.16. Koncepcja ta bazuje na zjawisku modulacji amplitudowej sygnału o częstotliwości zazębenia [9] przez sygnał wolnozmienny charakteryzujący fluktuacje obciążenia. Na rys. 16 pokazano sygnał zmodulowany amplitudowo (funkcja modulująca reprezentowana jako przebieg sinusoidalny), jego obwiednie i sygnał znormalizowany (normalizacja polega na podzieleniu sygnału zmodulowanego przez obwiednie).



Rys. 16. Idea normalizacji sygnału

Podczas testowania tej metody dla sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych na przekładni autor napotkał wiele problemów, których wyjaśnienie uzyskano na podstawie opracowanego modelu. Procedura normalizacji polega na:

- demodulacji sygnału,
- odfiltrowaniu użytecznej (związanej ze zmianami obciążenia) części obwiedni (filtracja dolnoprzepustowa),
- podzieleniu sygnału zmodulowanego przez przygotowany sygnał obwiedni.

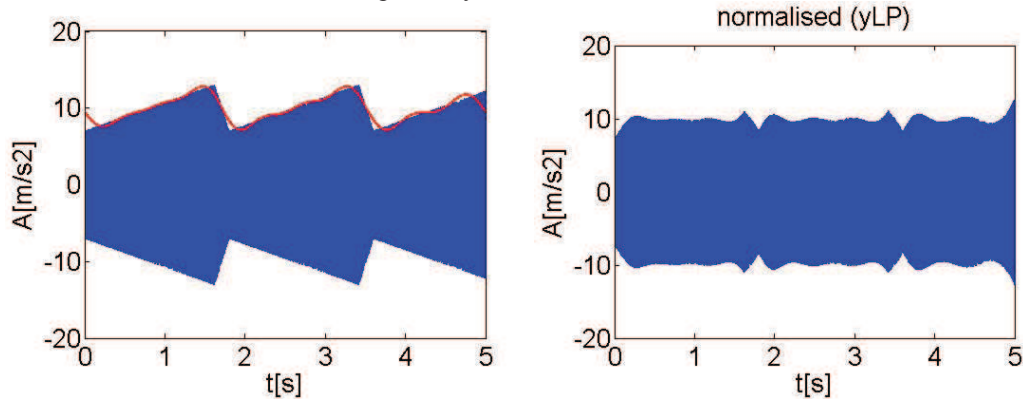
Jak się okazało kluczowym zagadnieniem jest ekstrakcja użytecznej części obwiedni. Ze względu na występowanie modulacji pochodzącej od obciążenia i od nieprawidłowej pracy jarzma, niewielkie różnice częstotliwości modulujących i złożoną postać sygnału obciążenia oddzielenie tych składowych w sygnale obwiedni jest bardzo utrudnione. Zastosowanie filtracji dolnoprzepustowej z częstotliwości graniczną dobraną tak, aby odseparować częstotliwość pochodzącą od jarzma powoduje zniekształcenia sygnału (część energii sygnału obciążenia jest tracona). Pozyskanie zniekształconej postaci sygnału obciążenia powoduje zniekształcenie sygnału po normalizacji (rys. 17 i 19).

Przeprowadzony eksperyment symulacyjny polegający na zwiększeniu częstotliwości granicznej filtra dał bardzo dobre rezultaty (brak zniekształceń w znormalizowanym sygnale) i potwierdził hipotezę, że główną przyczyną błędów w normalizacji jest zniekształcona obwiednia. (rys. 18 i 20).

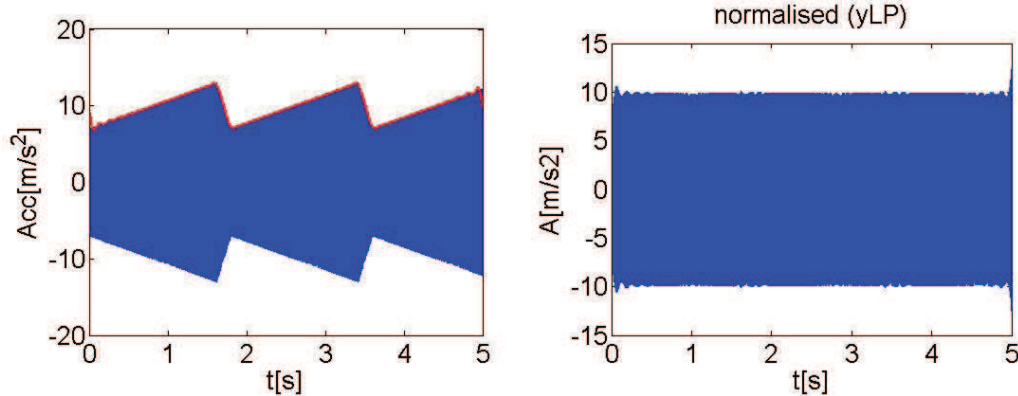


Występowanie jednocześnie modulacji pochodzących od obciążenia i od nieprawidłowej pracy jarzma powoduje dodatkowe kłopoty w procesie normalizacji. Na rys. 17-20 przedstawiono wyniki eksperymentów symulacyjnych dla częstotliwości jarzma  $f_{JARZMA}=4.5$  Hz oraz  $f_{JARZMA}=45$  Hz. W pierwszym

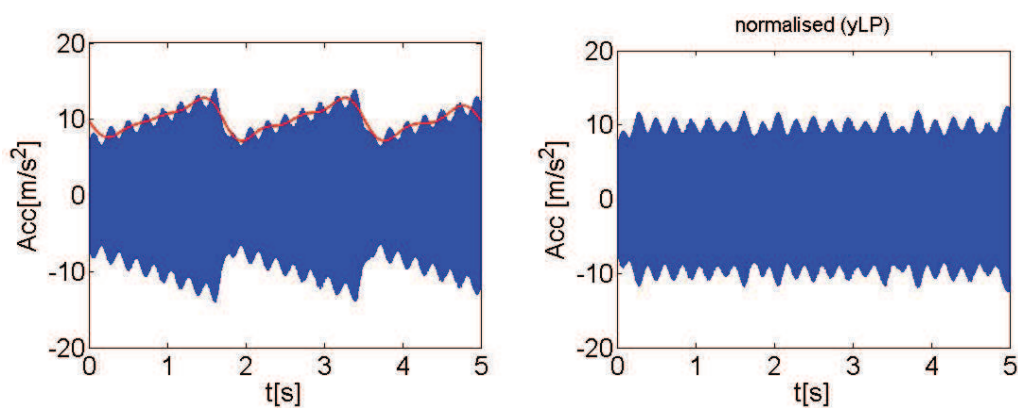
przypadku widoczne są zniekształcenia przebiegu spowodowane deformacją pozyskanego sygnału obciążenia natomiast w drugim przypadku wynik jest zadowalający (aczkolwiek można zauważyć niewielkie zniekształcenia).



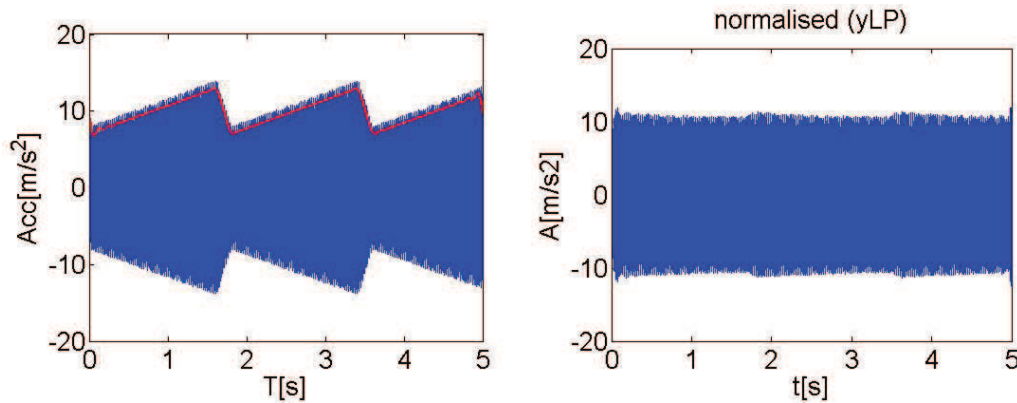
Rys. 17. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (tylko obciążenie), filtracja  $f_{LP}=4$ Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys. 18. a) Sygnał zmodulowany amplitudowo (obciążenie), filtracja  $f_{LP}=40$ Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys. 19. a) Sygnał podwójnie zmodulowany amplitudowo (obciążenie oraz jarzmo  $f=4.5$ Hz), filtracja  $f_{LP}=4$ Hz, b) sygnał znormalizowany względem obciążenia



Rys. 20. a) Sygnał podwójnie zmodulowany amplitudowo (obciążenie oraz jarzmo  $f=45\text{Hz}$ ), filtracja  $f_{LP}=40\text{Hz}$ , b) sygnał znormalizowany względem obciążenia

## 8. WNIOSKI

W artykule przedstawiono uproszczony model sygnału generowanego przez przekładnię planetarną pracującą w zmiennych warunkach obciążenia. Model bazuje na zjawiskach modulacji amplitudowej i częstotliwościowej i uwzględnia wpływ czynników eksploatacyjnych (zmiennego cyklicznie obciążenia zewnętrznego powodującego zmienne odkształcenia zębów oraz cyklicznie zmiennego obciążenia zewnętrznego powodującego zmianę punktu pracy na charakterystyce silnika, co powoduje zmianę prędkości obrotowej na wejściu przekładni) oraz wpływ zmiany stanu reprezentowanej przez nieprawidłową pracę jarzma. Zaproponowany model wykorzystany został między innymi do testowania procedury normalizacyjnej Standera. Wykazano, że ze względu na zbliżone częstotliwości jarzma i obciążenia oparta na filtracji ekstrakcja sygnału zawierającego informacje o obciążeniu jest utrudniona. Pozyskanie niepełnej informacji o obwodni i wykorzystanie jej w procedurze normalizacji powoduje zniekształcenia unormowanego sygnału.

*Praca naukowa finansowana ze środków  
Komitetu Badań Naukowych w latach 2005- 2008  
jako projekt badawczy*

## LITERATURA

- [1] Stander C. J. And P. S. Heyns W. Schoombie *Using Vibration Monitoring For Local Fault Detection on Gears Operating Under Fluctuating Load Conditions*. Mechanical Systems And Signal Processing (2002) 16(6), 1005–1024.
- [2] Bartelmus W., Zimroz R.: *Planetary gearbox vibration signal analysis for condition monitoring* COMADEM Conference Cranfield 2005.
- [3] Bartelmus W, Zimroz R, Hrynyszyn S: *Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do*

*napędu koła czerpakowego*, Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2006.

- [4] Dabrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: *Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu Warszawa – Katowice – Radom 2000.
- [5] Radkowski S.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*. Wyd. ITE Radom 2002.
- [6] Bartelmus W., Zimroz R.: *Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do napędu koła czerpakowego*. submitted to Diagnostyka 1(37)/2006).
- [7] Bartelmus W.: *Diagnostyka Maszyn*. Górnictwo Odkrywkowe wyd. Slask 2000.
- [8] Szepietowski M.: *Model obciążenia obwodowego koła czerpakowego w badaniach symulacyjnych napędu koła*. IV Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania TUR 2005.
- [9] Randall R. B.: *A new method of modeling gear faults*. 1982 Journal of Mechanical Design 104, 259–267.



Dr inż. **Radosław ZIMROZ**. Absolwent Akustyki Wydziału Elektroniki PWr 1998, doktorat na Wydziale Górniczym PWr. 2002 (z wyróżnieniem). Od 1998 w Zakładzie Systemów Maszynowych IG PWr. Staż naukowy (9 miesięcy) w Wielkiej Brytanii w Cranfield University (SOE/PASE/AMAC). Zainteresowania: modelowanie i diagnostyka przekładni zębatych, przetwarzanie sygnałów drganiowych, zastosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn, systemy monitorowania i diagnozowania stanu maszyn na podstawie drgań.