

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **223044**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **396179**

(51) Int.Cl.  
**G01M 13/02 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **02.09.2011**

---

(54) **Sposób wykrywania uszkodzeń przekładni planetarnych turbin wiatrowych**

---

(43) Zgłoszenie ogłoszono:  
**02.07.2012 BUP 14/12**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:  
**31.10.2016 WUP 10/16**

(73) Uprawniony z patentu:  
**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,  
Kraków, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:  
**TOMASZ BARSZCZ, Kraków, PL  
ADAM JABŁOŃSKI, Kraków, PL**

(74) Pełnomocnik:  
**rzecz. pat. Jolanta Woźniak**

---

**PL 223044 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób wykrywania uszkodzeń przekładni planetarnych turbin wiatrowych, umożliwiający ocenę stanu technicznego przekładni planetarnych, a szczególnie w przypadku pracy ze zmienną prędkością obrotową oraz o względnie niskiej prędkości obrotowej. Wynalazek umożliwia detekcję uszkodzeń zębów koła głównego, detekcję uszkodzeń zębów planet, detekcję uszkodzeń zębów koła słonecznego oraz identyfikację uszkodzenia – określenie, które z w/w uszkodzeń ma miejsce. Wynalazek znajduje zastosowanie dla przekładni planetarnych z nieruchomym kołem głównym.

Z europejskiego opisu patentowego EP 2213998 znany jest sposób oceny stanu technicznego przekładni zębatych, który polega na założeniu, że uszkodzenie spowoduje odłamanie się fragmentu koła zębatego, co spowoduje wyraźny wzrost amplitud komponentów sygnału, co wyklucza detekcję pewnej grupy uszkodzeń przekładni planetarnej.

Ze zgłoszenia międzynarodowego WO 2004065927 znany jest sposób wyłącznie na detekcję uszkodzeń koła słonecznego przekładni planetarnej.

Z amerykańskiego wynalazku US 6024324 znany jest sposób na detekcję uszkodzeń przekładni planetarnych stosowanych w helikopterach. Metoda ta wykorzystuje czwarty i szósty moment statystyczny sygnału drgań jako wskaźnik detekcji uszkodzeń. Dodatkowo wynalazek ten wykorzystuje dodatkowy sygnał z czujników tzw. „azymutu”.

Z kolei z polskiego zgłoszenia patentowego P-331223 znane jest rozwiązanie dotyczące oceny stanu technicznego przekładni zębatych z użyciem czujników magnetycznych. Sposób wykrywania wylamań zęba koła zębatego przekładni, polega na tym, że wykorzystuje się nieindukcyjny przetwornik pola magnetycznego, który umieszcza się w szczelinie magnetycznej tworzonej przez kolejny wierzchołek zęba i nieruchomy stały magnes lub elektromagnes za pomocą którego przetwarza się natężenie pola magnetycznego w szczelinie na napięcie wzmacniane we wzmacniaczu.

Również z międzynarodowego zgłoszenia patentowego WO 02095633 znany jest sposób oceny stanu technicznego szerokiej gamy elementów maszyn, w tym również przekładni planetarnych, który polega na śledzeniu zmian w trendach indykatorów stanu technicznego elementów maszyn obliczonych z sygnałów drgań, przy czym sposób ten zakłada podwójne tory pomiarowe w procesie przetwarzania sygnałów. Dodatkowo, w przypadku diagnostyki przekładni, sposób zakłada różną ilość zębów na każdym kole zębatym oraz różne typy łożysk w węźle kinematycznym (co nie jest przypadkiem przekładni planetarnych z uwagi na jedną konfigurację kinematyczną planet).

Okazało się nieoczekiwanie, że można bardzo precyzyjnie określić stan techniczny przekładni planetarnych turbin wiatrowych, a szczególnie w przypadku ich pracy ze zmienną prędkością obrotową oraz o względnie niskiej prędkości obrotowej sposobem według wynalazku.

Sposób wykrywania uszkodzeń przekładni planetarnych turbin wiatrowych, których układ kinematyczny zawiera przekładnię planetarną, przekładnię równoległą oraz generator, polega na tym, że dokonuje się rejestracji cyfrowego sygnału przyspieszenia drgań z czujnika zamontowanego na obudowie przekładni planetarnej i referencyjnego sygnału prędkości z czujnika zamontowanego na wałku sprzężonym z przekładnią planetarną (korzystnie wałek sprzężony bezpośrednio z generatorem), po czym przetwarza się zebrane sygnały, modyfikuje sygnał drgań i segmentuje go względem obrotów jarzma, czyli również obrotu planety wokół koła głównego, dokonuje się segmentacji każdego fragmentu sygnału względem ilości zębów koła głównego, a następnie zapisuje sygnał w formie macierzy, w której każda komórka zawiera fragment sygnału drgań przypadający (w dziedzinie kąta) na czas pracy pojedynczego zęba koła głównego w wybranym obrocie jarzma, następnie oblicza się energię z każdego elementu macierzy, jako sumę kwadratów wartości fragmentu sygnału, i wyświetla macierz jako trójwymiarowy wykres w postaci mapy. Korzystnie jest, gdy czujnik prędkości umieszczony jest na wałku szybkim, a referencyjny sygnał prędkości korzystnie określa 1 impuls na 1 obrót wałka szybkiego. Rozwiązanie umożliwia ocenę stanu technicznego przekładni planetarnej na podstawie obliczania energii sygnału drgań przypadającej na czas pracy każdego z zębów koła głównego z osobna w procesie zazębiania, ocenę stanu technicznego przekładni planetarnej w przypadku pracy ze zmienną prędkością obrotową dzięki analizie sygnału prędkości obrotowej oraz pozwala na użycie sygnału prędkości z dowolnego punktu kinematycznego (okres obrotu przekładni planety nie musi być wielokrotnością okresu sygnału referencyjnego). Ponadto, sposób nie dokonuje uśrednień sygnału drgań względem obrotów elementów maszyny (wałków, ilości kół zębatych), jak to ma miejsce w przypadku znacznej liczby dotychczas znanych rozwiązań.

Przedstawiony sposób nie wymaga informacji na temat położenia planet oraz umożliwia ocenę stanu technicznego przekładni planetarnych o względnie niskiej prędkości obrotowej.

Przedmiot wynalazku został uwidoczniony na rysunkach schematycznych, na których Fig. 1 przedstawia schemat przekładni planetarnej PP i przekładni równoległej PR turbiny wiatrowej, na którym oznaczono A – koło główne, B – koło słoneczne, C – jarzmo, D – planeta, Fig. 2 przedstawia ogólny schemat wynalazku, Fig. 3 przedstawia schemat sygnału drgań i referencyjnego sygnału prędkości, Fig. 4 przedstawia kąt obrotu jarzma przypadający na czas pracy pojedynczego zęba koła głównego, Fig. 5 przedstawia opis wykresu umożliwiającego detekcję uszkodzeń przekładni planetarnej, Fig. 6 obrazuje przykład użycia wynalazku do oceny stanu technicznego przekładni planetarnej.

Przekładnię planetarną 1 i przekładnię równoległą 2 charakteryzują dane kinematyczne takie jak:

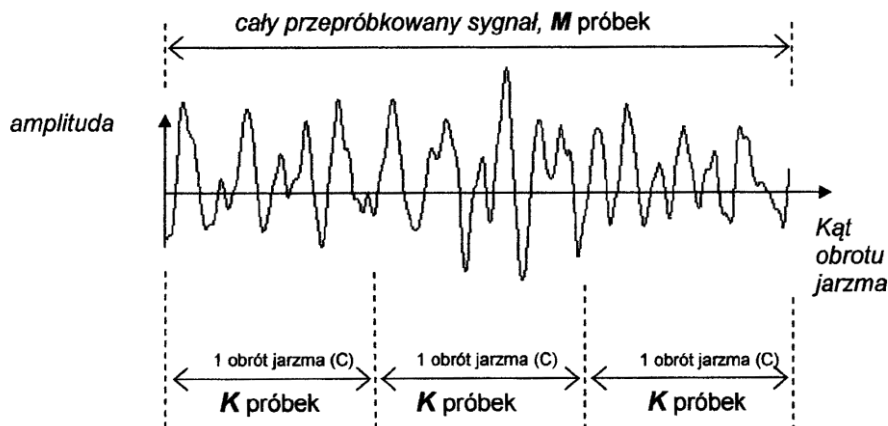
- ilość planet przekładni planetarnej
- ilość zębów na kole słonecznym przekładni planetarnej
- ilość zębów na planecie
- ilość zębów na kole głównym przekładni planetarnej
- ilości zębów na wszystkich kołach kolejnych stopniach przekładni równoległej pomiędzy przekładnią planetarną a wałkiem, z którego zbierany jest referencyjny sygnał prędkości.

Sposób polega na tym, że umieszcza się czujniki na elementach maszyny, uruchamia się maszynę i rejestruje sygnały, które następnie się modyfikuje i analizuje. Dane kinematyczne 10 przekładni planetarnej 1 i przekładni równoległej 2 służą do wyznaczenia parametrów operacji przepróbkowania sygnału drgań 8. Przepróbkowanie sygnału drgań 8 ma na celu zapewnienie całkowitej ilości próbek każdego z fragmentów sygnału drgań 8 odpowiadającego kątowi obrotu jarzma C przypadającego na czas pracy pojedynczego zęba koła głównego A.

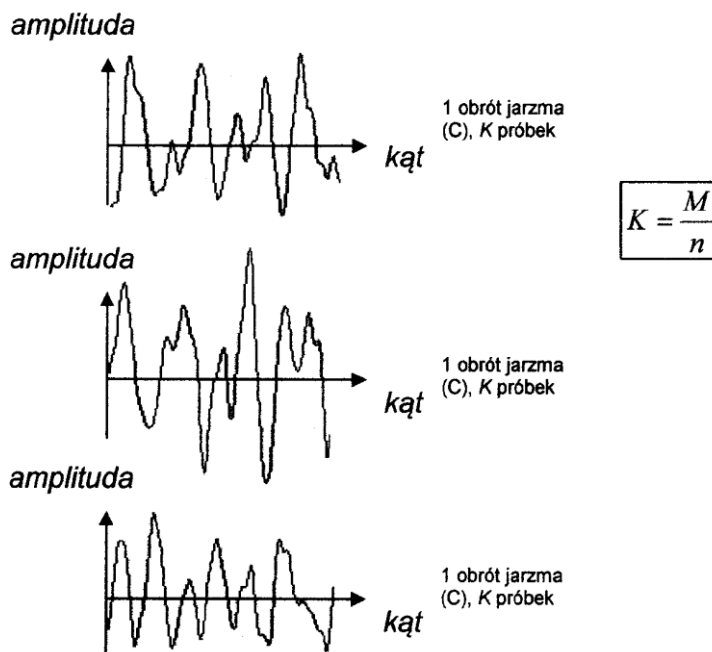
Sposób polega na tym, że rejestruje się cyfrowy sygnał przyspieszenia drgań 8 z czujnika przyspieszenia drgań 5 zamontowanego na obudowie przekładni planetarnej 1 oraz z referencyjnego sygnału prędkości 9 z czujnika 6 zamontowanego na wałku 3 (możliwie na wałku szybkim), następnie „przygotowuje” się sygnał drgań 8 do przetwarzania i uzyskania finalnego trójwymiarowego wykresu – mapy 11, w tym celu modyfikuje się sygnał drgań 8, modyfikacja ma spełniać 2 wymagania i jest możliwa z użyciem ogólnodostępnych technik, tzw. przepróbkowania sygnału (znanego głównie z języka ang. jako „resampling”). Modyfikacja sygnału drgań 8 według wynalazku, ma zapewnić spełnienie następujących wymagań względem przepróbkowanego sygnału drgań 8:

- a) całkowita ilość próbek  $K$  przypadająca na jeden obrót jarzma C (tj. pełny obieg jednej planety D wokół koła głównego A) przekładni planetarnej 1
- b) podzielność ilości próbek  $K$  przypadającej na jeden obrót jarzma C przez ilość zębów  $Z_r$  na kole głównym A przekładni planetarnej 1

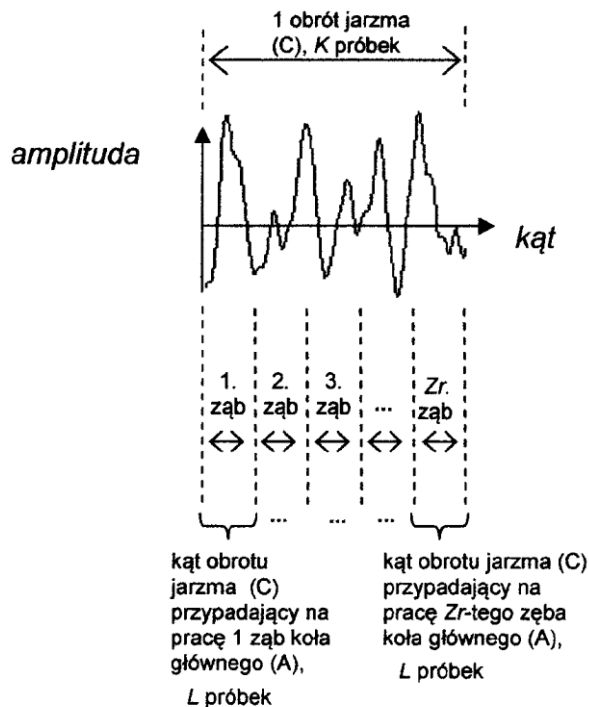
Obydwa warunki mają być spełnione jednocześnie. Gwarantuje to, iż sygnał drgań 8 może być podzielony na fragmenty każdy o długości  $L$  próbek odpowiadające obrotowi jarzma C o kąt przypadający na czas pracy pojedynczych zębów koła głównego A. Ilość obrotów jarzma C zarejestrowana w sygnale drgań 8 uzyskuje się na podstawie referencyjnego sygnału prędkości 9 oraz danych kinematycznych 10. Wykres poniżej obrazuje pierwszy etap segmentacji przepróbkowanego sygnału drgań 8 – segmentację zmodyfikowanego sygnału drgań 8 względem  $n$  obrotów jarzma (czyli również obrotu planety D wokół koła głównego A).



W ten sposób, z pojedynczego przepróbowanego sygnału drgań 8 o długości  $M$  próbek otrzymuje się  $n$  fragmentów sygnału, każdy o długości  $K$  próbek, co przedstawiono na wykresie poniżej.



W drugim etapie segmentacji, każdy z otrzymanych fragmentów sygnału dzielimy względem ilości zębów  $Z_r$  na kole głównym A, co przedstawiono na wykresie poniżej.



Wykres ilustruje podział pojedynczego fragmentu przepróbowanego sygnału drgań 8 przypadającego na jeden obrót jarzma C na fragmenty odpowiadające obrotowi jarzma C o kąt przypadający na pracę jednego zęba koła głównego A przekładni planetarnej 1. Kąt obrotu  $\alpha$  jarzma C przypadający na pracę pojedynczego zęba koła głównego A został przedstawiony na fig. 3.

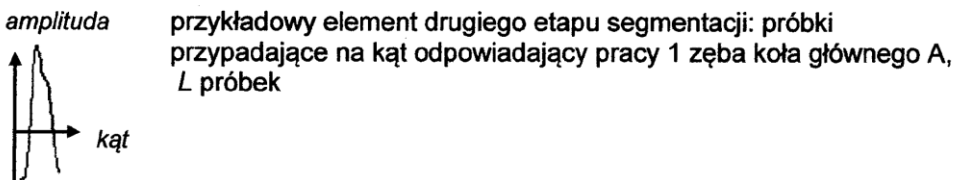
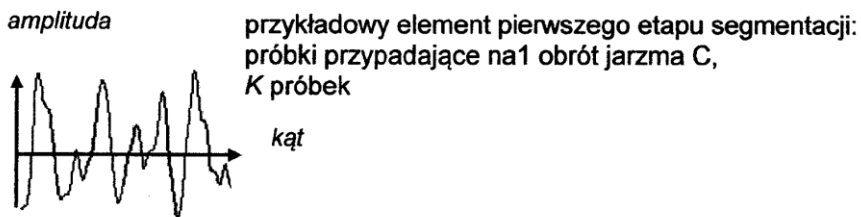
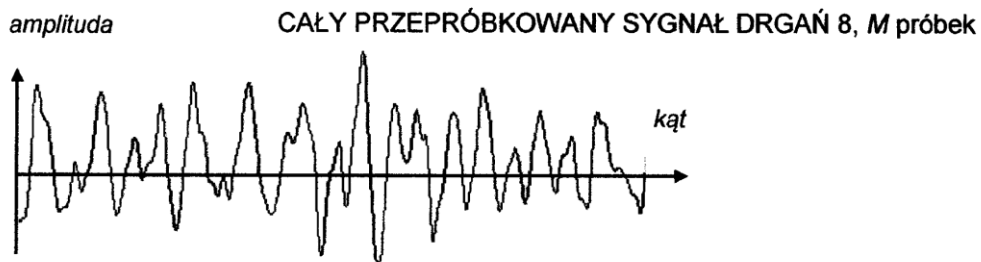
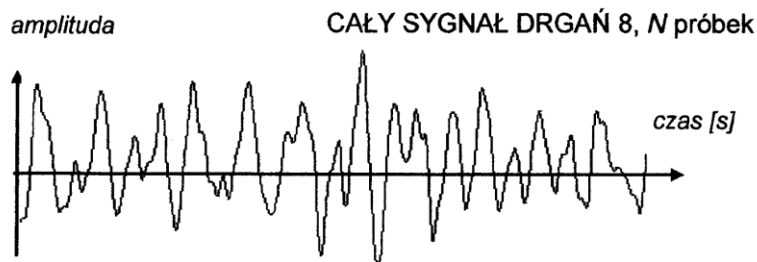
Po drugim etapie segmentacji zmodyfikowanego sygnału drgań 8, każdy spośród liczby  $Z_r$  fragmentów składa się z liczby  $L$  próbek, wyznaczonej na podstawie wzoru poniżej.

$$L = \frac{K}{Z_r}$$

$L$  – ilość próbek przypadająca na pracę jednego zęba koła głównego A przekładni planetarnej 1 (w dziedzinie kąta)

$Z_r$  – ilość zębów koła głównego A przekładni planetarnej 1

W kolejnym kroku sposobu następuje zapis zmodyfikowanego i pofragmentowanego sygnału drgań 8 w formie macierzy, w której każda komórka zawiera fragment zmodyfikowanego sygnału drgań 8 przypadający (w dziedzinie kąta) na pracę pojedynczego zęba koła głównego A w wybranym obrocie jarzma C. Poniższy wykres ilustruje w sposób zbiorczy kolejne etapy tworzenia fragmentu sygnału zapisanego w poszczególnych komórkach macierzy.



Poniższy rysunek ilustruje utworzoną macierz, w której kolejne rzędy reprezentują kolejne obroty jarzma C poprzez  $Z_r$  fragmentów sygnału, każdy o  $L$  ilości próbek o łącznej ilości  $K$  próbek, natomiast kolejne kolumny reprezentują część sygnału dla wszystkich obrotów jarzma C zarejestrowanych w sygnale przypadający na kąt odpowiadający pracy kolejnych zębów koła głównego A.

indeksy kolejnych zębów koła głównego  
(łącznie jeden obrót jarzma o  $2\pi$ )

	1	2	3	....	Zr
1	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek
2	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek
3	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek
obroty jarzma	...				
n	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek	L próbek

Następnie, dokonuje się obliczenia energii z każdego elementu macierzy, jako suma kwadratów wartości fragmentów sygnału, co przedstawia rysunek poniżej. Dla każdego fragmentu zmodyfikowanego sygnału drgań 8 o wymiarze  $\langle 1 \times L \rangle$  oblicza się energię jako sumę kwadratów wartości fragmentów sygnału, korzystnie według powszechnie znanego wzoru:

$$E = \sum_{i=1}^L (x[i])^2$$

gdzie:

$x[i]$  – pojedynczy fragment zmodyfikowanego sygnału drgań 8 przypadający na fragment wybranego obrotu jarzma C przekładni planetarnej 1 przypadający na czas pracy pojedynczego zęba koła głównego A przekładni planetarnej 1

indeksy kolejnych zębów koła głównego A  
(łącznie jeden obrót jarzma o  $2\pi$ )

	1	2	3	....	Zr
1	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek
2	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek
3	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek
obroty jarzma C	...				
n	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek	$\langle 1xL \rangle$ próbek

→

	1	2	3	....	Zr
1	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar
2	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar
3	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar
obroty jarzma C	...				
n	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar	E, $\langle 1x1 \rangle$ skalar

Fig. 5 obrazuje wyświetlenie macierzy jako trójwymiarowej kolorowej mapy, gdzie wartość energii określana jest poprzez zabarwienie, według przyjętej miary, np. od koloru niebieskiego (wartość najniższa) do koloru czerwonego (wartość najwyższa) i znajduje się na osi Z w układzie kartezjańskim XYZ. Osie X i Y przedstawiają (zgodnie z macierzą) kolejne obroty jarzma C oraz indeks kolejnych zębów od 1 do Zr koła głównego A przekładni planetarnej 1. Z kolei Fig. 6 stanowi przykład zastosowania wynalazku i ukazuje wyraźny wzór na uzyskanej mapie, który zaznaczony jest strzałkami. Ich kierunek mówi o konkretnym typie uszkodzenia przekładni planetarnej.

Wynalazek umożliwi ocenę stanu technicznego przekładni planetarnej, w tym uszkodzeń planet, koła głównego oraz koła słonecznego. Analiza kształtów na wykresie oraz kierunki tych kształtów stanowią podstawę do oceny stanu technicznego elementów przekładni planetarnej i identyfikację konkretnego uszkodzenia w przypadku jego detekcji.

#### Wykaz oznaczeń

- 1 – przekładnia planetarna
- 2 – przekładnia równoległa
- 3 – wałek
- 4 – generator
- 5 – czujnik drgań (na obudowie przekładni planetarnej)
- 6 – czujnik prędkości referencyjnej (korzystnie na wałku szybkim)
- 7 – urządzenie przetwarzające sygnały (komputer z oprogramowaniem)
- 8 – sygnał drgań (z obudowy przekładni planetarnej)
- 9 – referencyjny sygnał prędkości (korzystnie 1 impuls na 1 obrót wałka szybkiego (referencyjnego))
- 10 – dane kinematyczne przekładni planetarnej i przekładni równoległej
- 11 – trójwymiarowy wykres umożliwiający ocenę stanu technicznego przekładni planetarnej

### Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wykrywania uszkodzeń przekładni planetarnych turbin wiatrowych, których układ kinematyczny zawiera przekładnię planetarną, przekładnię równoległą oraz generator, **znamienny tym**, że dokonuje się rejestracji cyfrowego sygnału (8) przyśpieszenia drgań z czujnika (5) zamontowanego na obudowie przekładni planetarnej (1) i referencyjnego sygnału (9) prędkości z czujnika (6) zamontowanego na wałku (3) sprzężonym z przekładnią planetarną (4), po czym przetwarza się zebrane sygnały (8 i 9) w urządzeniu (7), przy czym modyfikuje się sygnał (8) przyśpieszenia drgań i segmentuje sygnał względem obrotów jarzma (C), czyli również obrotu planety (D) wokół koła głównego (A), dokonuje się segmentacji każdego fragmentu zmodyfikowanego sygnału (8) względem ilości zębów koła głównego (A), a następnie zapisuje się zmodyfikowany sygnał (8) w formie macierzy, w której każda komórka zawiera fragment sygnału drgań przypadający (w dziedzinie kąta) na czas pracy pojedynczego zęba koła głównego (A) w wybranym obrocie jarzma (C), oraz oblicza się energię z każdego elementu macierzy, jako sumę kwadratów wartości sygnału, a następnie wyświetla macierz jako trójwymiarowy wykres (11) w postaci mapy.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że korzystnie czujnik (6) referencyjnego sygnału prędkości umieszczony jest na wałku (3) szybkim, a referencyjny sygnał (9) prędkości określa 1 impuls na 1 obrót wałka (3) szybkiego referencyjnego.

## Rysunki

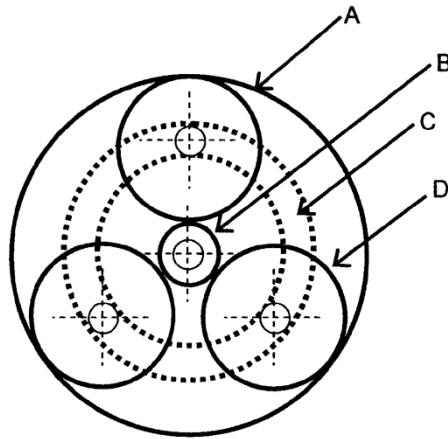


Fig.1

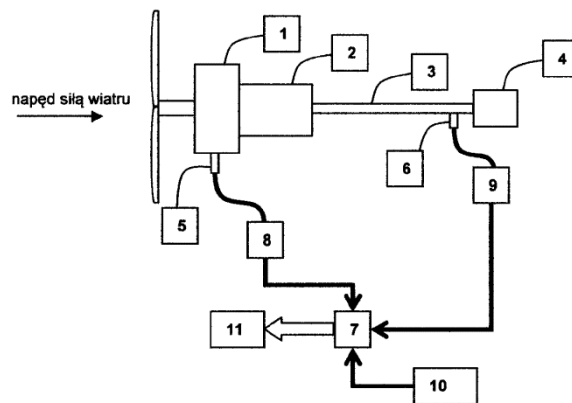


Fig.2



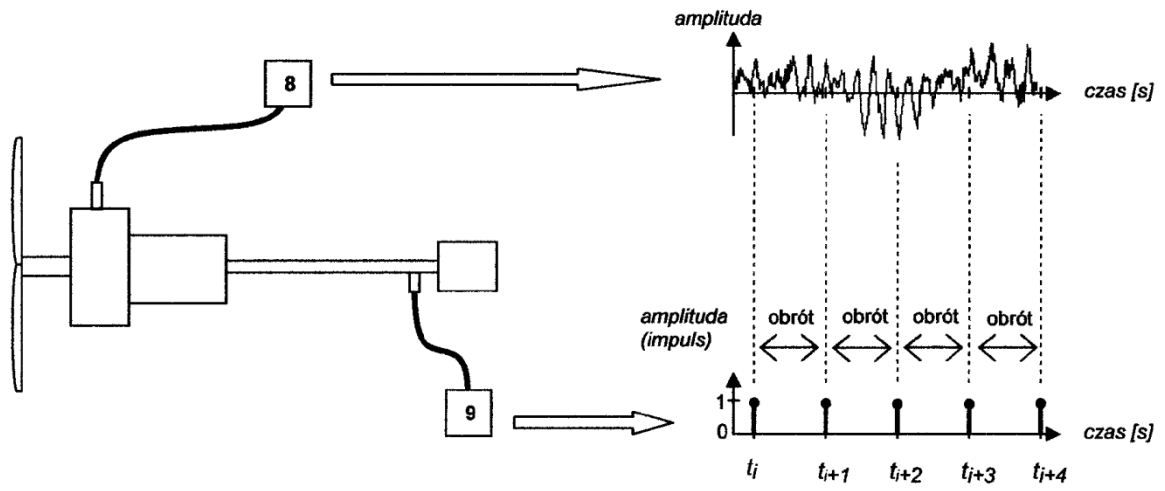


Fig.3

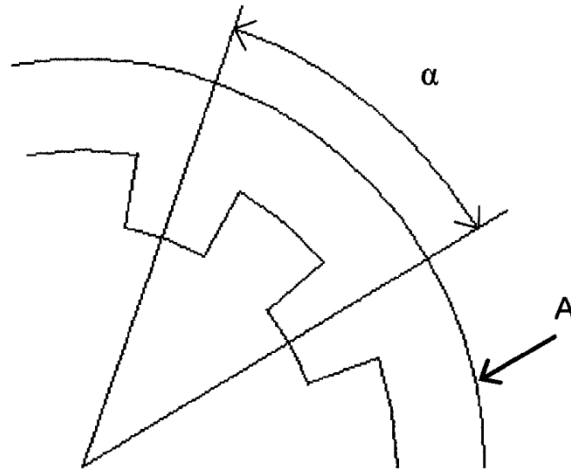


Fig.4

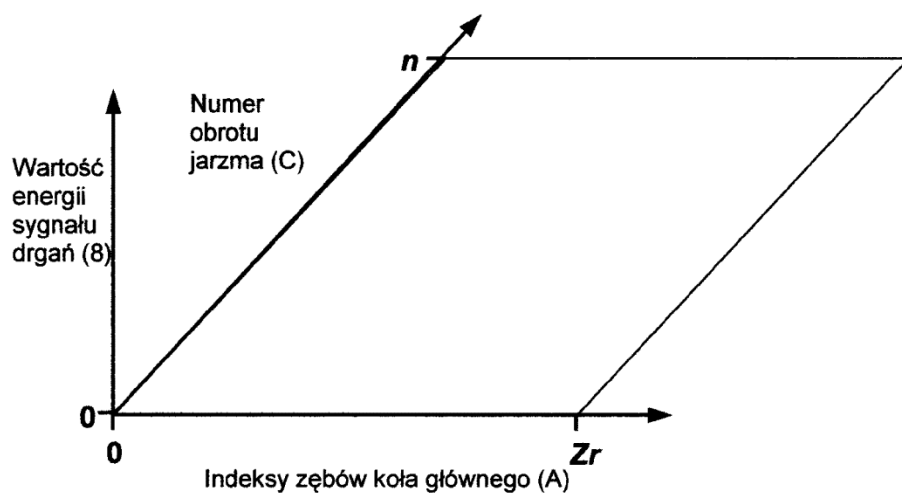


Fig.5

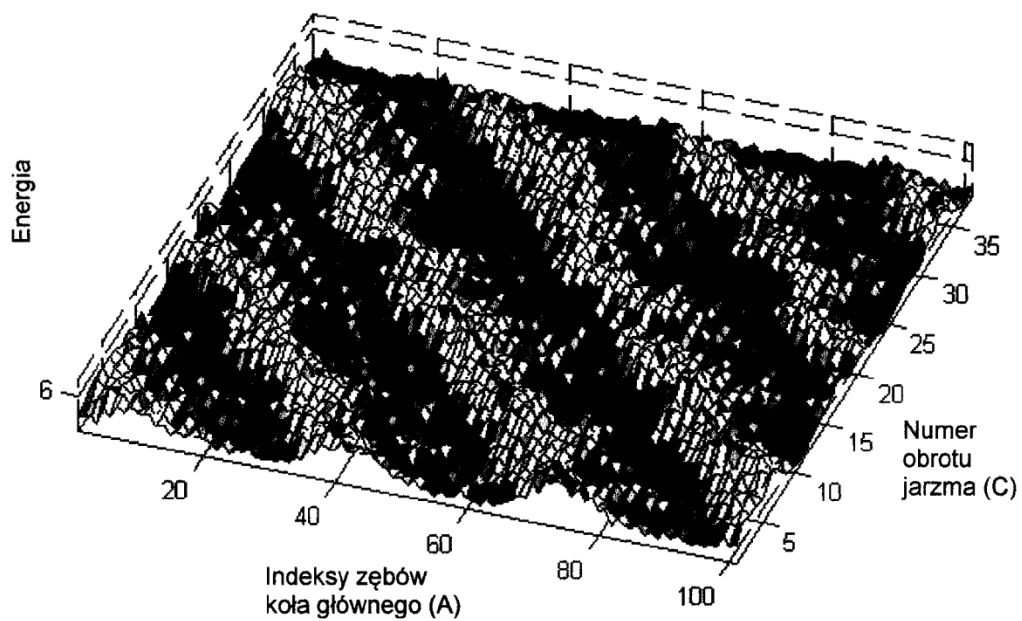


Fig.6