

## WYKRYWANIE WCZESNYCH FAZ USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH W WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

### EARLY FAULT DETECTION OF TOOTHED GEAR IN EXPLOITATION CONDITIONS

Przekładnie zębate są powszechnie wykorzystywane w układach napędowych maszyn i urządzeń. W trakcie ich eksploatacji bardzo istotne jest odpowiednio wczesne pozyskanie informacji o postępujących procesach degradacyjnych. Pozwala to na zaplanowanie we właściwym czasie niezbędnych przeglądów oraz napraw, zwiększając w ten sposób niezawodność wszystkich elementów łańcucha kinematycznego. Z tego powodu w artykule zawarto wyniki prac zespołu w zakresie diagnostyki wibroakustycznej uszkodzeń elementów przekładni zębatych. Przedstawiono przegląd badań symulacyjnych i doświadczalnych, których celem było opracowanie metod pozwalających na wczesną identyfikację uszkodzeń zębów w postaci pittingu powierzchni roboczych, wykruszenia wierzchołka, pęknięcia u podstawy zęba oraz częściowego wyłamania zęba. Dokonano oceny efektywności wybranych metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w procesie wykrywania uszkodzeń kół zębatych przy jednoczesnym występowaniu uszkodzeń łożyskowania przekładni pracujących w różnych warunkach. Wstępnie przetworzone sygnały drganiowe analizowane w dziedzinie czasu i częstotliwości stanowiły podstawę do opracowania miar diagnostycznych wrażliwych na wczesne stadia uszkodzeń. Miary otrzymane w wyniku symulacji oraz badań doświadczalnych wykorzystano do budowy zestawu wzorców klasyfikatora neuronowego diagnozującego rodzaj i stopień uszkodzenia kół przekładni z błędem walidacji poniżej 5%. Uzyskana zgodność jakościowa i ilościowa wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych wykazała, że wykorzystanie rozbudowanego i zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni w układzie napędowym, umożliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych.

**Słowa kluczowe:** przekładnie zębate, drgania, uszkodzenia kół, diagnostyka.

Toothed gears are commonly used in various power transmission systems. Collecting information about degradation processes early enough is crucial during their exploitation. It enables suitable planning of required inspections and repairs, improving the reliability of all kinetic chain elements. The article includes results of the team's research work on vibroacoustic diagnostic of gearbox components' faults. A review of simulation and experimental researches that aimed at elaboration of methods which would enable early identification of teeth faults in the form of working surface pitting, spalling of tooth crest, crack at the tooth bottom as well as partial breaking of a tooth, is presented. Assessment of selected methods of processing the vibroacoustic signals during the detection of gear faults has been carried out while faults occur in gear bearings working under various conditions. The initially processed vibration signals analyzed within time and frequency domains constituted a basis for preparation of detection measures that were sensitive to early stages of damage. The measures obtained as a result of simulation and experimental tests were used to construct a set of neuron classifier models to diagnose the type and degree of toothed wheels faults with a validation error below 5%. The achieved qualitative and quantitative conformity of simulation and experimental research results has shown that application of an expanded and identified dynamic model of the gear in a power transmission system enables the acquisition of reliable diagnostic relations.

**Keywords:** gearbox, vibration, gear fault, diagnostics.

#### 1. Wstęp

Przekładnie zębate projektowane są do współpracy ze źródłami napędu o coraz większej mocy i są narażone na duże zewnętrzne obciążenia dynamiczne. W procesie projektowania dąży się do uzyskania jak największej wartości stosunku mocy przenoszonej przez koła do ich masy. Mocno obciążona przekładnia powinna być doraźnie lub ciągle monitorowana w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji. Techniki diagnozowania stanu technicznego przekładni zębatych ukierunkowane są na identyfikację uszkodzeń w początkowej fazie.

Jedną z najczęściej stosowanych metod jest pomiar sygnału wibroakustycznego i określenia na jego podstawie miar wrażli-

#### 1. Introduction

Toothed gears are designed for cooperation with sources of drive of higher and higher power and are exposed to high external dynamic loads. In the design process, designers are trying to achieve the highest possible ratio of power transmitted through wheels to their weight. A gear working under high load should be either sporadically or constantly monitored to ensure safe operation. The techniques of diagnosing the technical condition of gears are oriented towards identification of faults in the initial phase.

liwych na różne rodzaje uszkodzeń. Szybkość rozprzestrzeniania się zaburzeń wibroakustycznych wywołanych zmianą stanu przekładni powoduje, że metody wibroakustyczne są szczególnie przydatne w diagnozowaniu wczesnych stadiów uszkodzeń.

Ostatnio znacznie rozwinęły się techniki bezkontaktowego pomiaru drgań. Umożliwiają one pomiar prędkości drgań elementów wirujących. Pomiar prędkości drgań wirujących wałów umożliwia eliminację wpływu złożonej i zmiennej w czasie transmitancji układu łożysko-korpus przekładni.

Ważnym zagadnieniem w diagnozowaniu przekładni jest umiejętność rozróżnienia oddziaływania na sygnał wibroakustyczny różnych zjawisk związanych zarówno z jej normalną pracą jak i zmianami wywołanymi rozwojem uszkodzeń jej elementów.

Najbardziej podatnymi na uszkodzenia elementami przekładni są koła zębate i łożyska. Nowoczesne metody diagnozowania przekładni zębatach ukierunkowane są na wykrywanie wczesnych faz rozwoju uszkodzeń takich jak wykruszenie wierzchołka zęba, pęknięcie zęba u podstawy, zmęczenie wykruszenia warstwy wierzchniej, zatarcie współpracujących powierzchni i inne. W diagnozowaniu łożysk tocznych bardzo ważne jest wykrycie początkowych stadiów uszkodzeń bieżni i elementów tocznych.

Rozwój sprzętu komputerowego i metod przetwarzania sygnałów umożliwia wykorzystanie w procesie diagnozowania zaawansowanych metod analizy sygnałów na płaszczyźnie czas-częstotliwość. Metody te pozwalają obserwować niestacjonarne, impulsowe zaburzenia sygnałów wywołane uszkodzeniami w ich początkowych stadiach.

Badania eksperymentalne przekładni są trudne do zrealizowania, kosztowne i czasochłonne, a w przypadku przekładni produkowanych jednostkowo, często niemożliwe. W takich przypadkach celowe jest wykorzystanie zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębataj w układzie napędowym [7, 9, 12, 16, 19]. Umożliwi on przeprowadzenie serii eksperymentów numerycznych, a analiza wyników symulacji pozwala na powiększenie bazy wiedzy diagnostycznej i uzyskanie większej pewności diagnozy.

Do monitorowania stanu wielu układów napędowych, tworzy się systemy ekspertowe, wykorzystujące metody sztucznej inteligencji [3, 17, 23]. Odpowiednio skonstruowany i nauczony system może automatycznie rozpoznać występujące uszkodzenia. Sieci neuronowe w procesie uczenia nabywają zdolność uogólniania wiedzy, co pozwala na wykrywanie uszkodzeń w ich wczesnych fazach. Podstawowym problemem przy budowie tych systemów jest zdefiniowanie zbioru danych wejściowych i pozyskanie odpowiednio licznego zbioru danych uczących [3].

## 2. Metody analizy sygnałów w diagnostyce przekładni zębatach

W diagnostyce wibroakustycznej przekładni zębatach stosuje się wiele różnych metod analizy sygnałów [2, 4, 8, 10, 11, 13, 14, 20-22].

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny podział stosowanych metod przetwarzania sygnałów.

Podstawę stanowi odpowiednio wyselekcjonowany sygnał wibroakustyczny (WA), który w celu eliminacji przypadkowych zakłóceń może zostać uśredniony synchronicznie, dodatkowo,

One of the most frequently applied methods is measurement of the vibroacoustic signal and on this basis, determination of measures sensitive to different types of damage.

The rate of propagation of vibroacoustic disturbance caused by a changed condition of a gear makes the vibroacoustic methods particularly useful in diagnosing early stages of faults.

Recently, techniques of non-contact measurement of vibration have developed considerably. They enable measuring the vibration speed of rotating bodies. Measurements of the vibration velocity of rotating shafts make it possible to eliminate the consequences of complex and variable in time transmittance of the bearing/gearbox system.

An essential issue in the diagnosing of gearboxes is the ability to differentiate between various phenomena influencing the vibroacoustic signal connected with both, normal operation of the gearbox and development of faults in its components.

Toothed wheels and bearings are the gearbox components most susceptible to damage. The modern diagnosing methods of gearboxes are oriented to the detection of early phases of fault occurrence, e.g. spalling of tooth crest, crack at the tooth bottom, fatigue chipping of the upper layer, or galling of the interacting surfaces. In the diagnosing of rolling bearings, detection of initial stages of damage to the bearing race or rolling elements is extremely important.

The development of computer hardware and signal processing methods enables using advanced signal analysis methods in the time-frequency plane. The methods allow observation of non-stationary impulse disturbance induced by faults in their initial stages.

Experimental research on gearboxes is difficult to carry out, as well as costly and time-consuming, and in the case of gears produced as single items, most often impossible. In such cases, it is justified to use an identified dynamic model of a gear in a power transmission system [7, 9, 12, 16, 19]. Such model will allow making a series of numerical experiments and analysis of the simulation results will enable expanding the diagnostic knowledge and obtaining higher certainty of the diagnosis.

For the monitoring of the condition of many power transmission units, expert systems are created, which use artificial intelligence methods [3, 17, 23]. A properly constructed and taught system can automatically recognize the existing faults. Neuron networks, in the process of learning, acquire the ability of generalizing knowledge, which allows detection of faults in their early phases. A basic problem while constructing such systems is to define a set of input data and acquire an appropriately large set of training data [3].

## 2. Signal analysis methods in the diagnosing of gearboxes

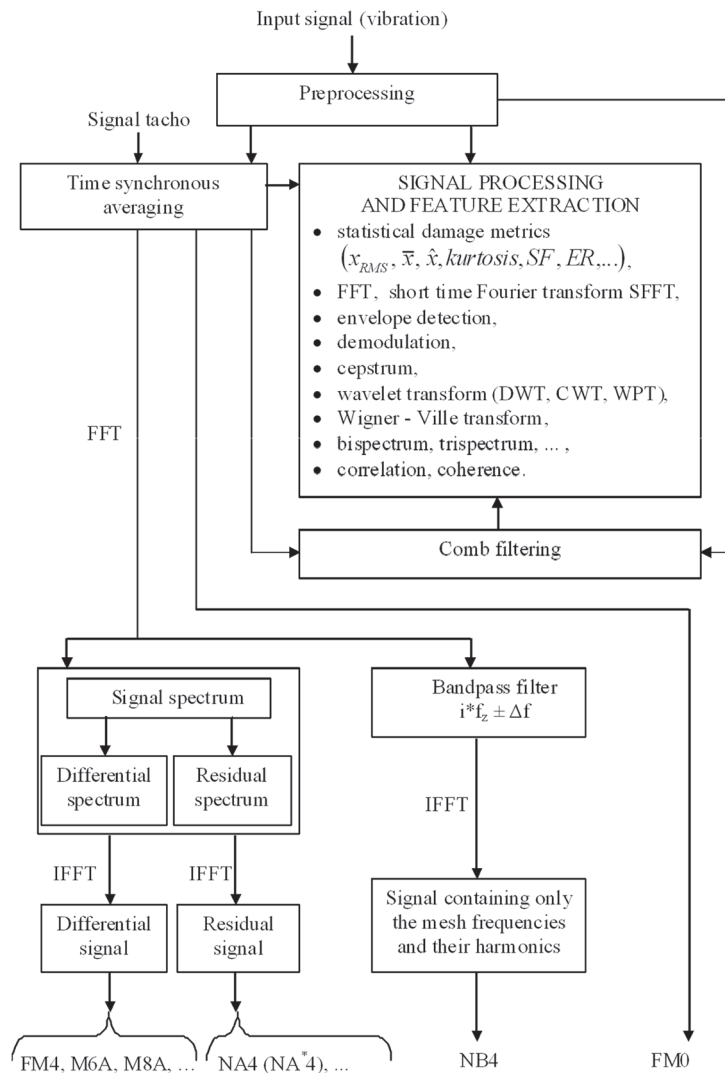
In vibroacoustic diagnostic of gearboxes, a number of different signal analysis methods are used [2, 4, 8, 10, 11, 13, 14, 20-22].

Figure 1 presents a general classification of the existing signal processing methods.

The basis consists of a properly selected vibroacoustic signal (WA) which, in order to eliminate incidental disturbance, can be synchronously averaged and from which, by applying

stosując odpowiednią filtrację, uzyskuje się z niego sygnały różnicowy i resztkowy oraz sygnał zawierający tylko pasma częstotliwości zazębenia i jej harmonicznych. Na podstawie dwóch pierwszych sygnałów oblicza się estymatory liczbowe amplitudy oraz dyskryminanty bezwymiarowe, stosuje się metody analizy w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasu i częstotliwości a także momenty statystyczne wyższych rzędów. Natomiast na podstawie sygnałów różnicowego i resztkowego [3, 8, 14, 18] najczęściej określa się dyskryminanty bezwymiarowe bazujące na momentach statystycznych wyższych rzędów (FM4, M6A, M8A, NA4 ...).

W przypadku jednoczesnego występowania uszkodzeń kół i łożysk celowe jest stosowanie filtracji grzebieniowej umożliwiającej separację sygnałów drganiowych generowanych przez róż-  
ne uszkodzenia [13].



Rys. 1. Sposoby przetwarzania sygnałów wibroakustycznych [13]  
Fig. 1. Methods of vibroacoustic signal processing [13]

appropriate filtration, a differential and residual signals are obtained, as well as a signal containing only bands of meshing frequency and its harmonics. On the basis of the first two signals, numerical estimators of amplitude and dimensionless discriminants are calculated. Analysis methods are used in time domain, frequency domain, or in time and frequency domain, as well as statistical moments of higher orders. Those dimensionless discriminants which are based on statistical moments of higher orders (FM4, M6A, M8A, NA4 ...)

are most often determined using differential and residual signals [3, 8, 14, 18]. In case of simultaneous occurrence of faults in wheels and bearings, it is justified to apply comb filtration, thus enabling separation of vibration signals generated by different faults [13].

### 3. Model przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym

W badaniach symulacyjnych wykorzystano zrealizowany w środowisku Matlab-Simulink model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym (rys. 2). Model uwzględnił charakterystykę napędzającego silnika elektrycznego, jednostopniowej przekładni zębatej, sprzęgieł oraz maszyny roboczej.

Model symulacyjny umożliwił również uwzględnienie w obliczeniach odchyłek cyklicznych i losowych występujących w zazębieniu [5, 9, 15].

Wykorzystanie modelu dynamicznego przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym, możliwe było dzięki bardzo dobrej identyfikacji i dostrojeniu parametrów modelu. Dało to w rezultacie dużą zgodność jakościową i ilościową wyników uzyskanych z symulacji z wynikami otrzymanymi z badań na obiekcie rzeczywistym [3, 9, 10, 13].

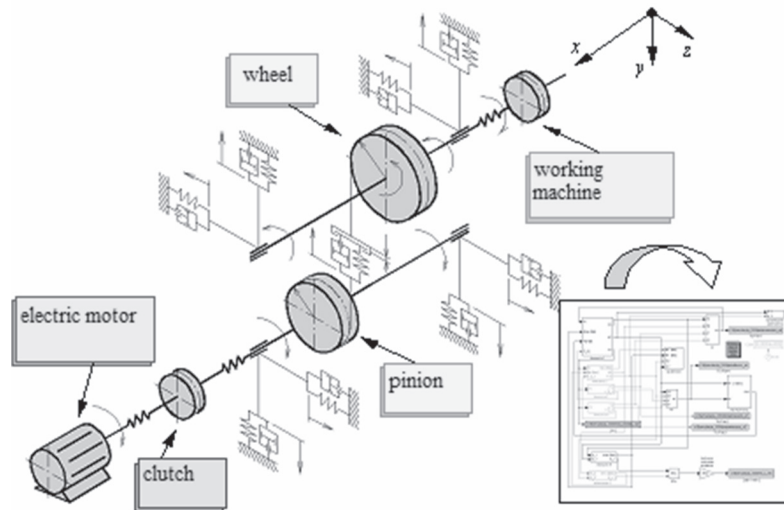
Model przekładni zębatej umożliwił również odwzorowanie lokalnych uszkodzeń w postaci pęknięcia u podstawy zęba

### 3. Model of toothed gear working in a power transmission system

In the simulation tests, a dynamic model was used representing a toothed gear working in a power transmission system (fig.2). The model was created in the Matlab-Simulink environment. It takes into account the characteristics of an electric driving motor, single-stage gear, clutches and working machine.

The simulation model allowed taking account, in the calculations, of cyclic and random deviations which occurred in the mesh [5, 9, 15].

The utilization of a dynamic model of gear in a power transmission system was possible owing to very good identification and tuning of the model parameters. It gave very high qualitative and quantitative consistency of simulation results with the results obtained from tests of a real object [3, 9, 10, 13].



Rys. 2. Model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym

Fig. 2. Dynamic model of toothed gear in a power transmission system

i wykruszenia wierzchołka zęba oraz uszkodzeń elementów łożysk tocznych.

Wykruszenie wierzchołka zęba na całej długości zostało zamodelowane jako skrócenie odcinka przyporu o wartość stanowiącą ustaloną część podziałki. Uwzględniono także wpływ zmiany długości odcinka przyporu na czas ząbkowania. Wykruszenie wierzchołka zęba zębniaka powoduje wcześniejsze zakończenie pracy pary zębów, natomiast wierzchołka koła, opóźnione rozpoczęcie współpracy pary zębów [13].

Pęknięciu u podstawy zęba towarzyszy spadek sztywności ząbkowania, stąd uszkodzenie tego rodzaju odwzorowano jako procentowe zmniejszenie sztywności współpracującej pary zębów w stosunku do pary nieuszkodzonej.

Analiza wpływu głębokości pęknięcia w stopie zęba na zmianę sztywności ząbkowania została przedstawiona w monografii [13].

W podobny sposób modelowano uszkodzenia powierzchni roboczych współpracujących elementów łożysk tocznych zmniejszając sztywność łożyska w czasie gdy uszkodzony fragment powierzchni znajdował się w strefie przenoszenia obciążenia [13].

#### 4. Wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba

Początkowe fazy rozwoju wykruszenia wierzchołka zęba koła w przekładni zębatej nie mają istotnego wpływu na ogólny poziom drgań. Stąd wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie jest bardzo trudne. Z dotychczasowych badań wynika, że wykorzystanie laserowego bezkontaktowego pomiaru prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów przekładni połączone z zaawansowanymi metodami przetwarzania sygnałów takimi jak rozkład Wignera-Ville'a (WV) i ciągła transformata falkowa (CWT) umożliwia wykrywanie tego uszkodzenia w jego początkowych stadiach. Ten sposób pomiaru eliminuje wpływ złożonej transmitancji układu łożysko-korpus przekładni [13].

Na rysunku 3 przedstawiono przetwarzanie zarejestrowanego sygnału drganiowego. W rozkładzie WV, sygnału różni-

The gear model also enabled mapping of local faults consisting of a crack at the tooth bottom or chipping of tooth crest, and faults of rolling bearings' components.

The chipping of tooth crest throughout its length was modeled as tooth contact section shortened by a value equal to a predetermined part of pitch. The effect of a changing tooth contact section length on the meshing time was taken into account as well. Chipping of tooth crest in a pinion results in a premature finish of operation by a couple of teeth, whereas chipping of the reference cone apex results in a delayed start of cooperation between the couple of teeth [13].

A crack at the tooth bottom is accompanied by reduced rigidity of meshing. Therefore, a fault of this sort was mapped as a percentage reduction of rigidity of the cooperating couple of teeth in relation to a couple without faults.

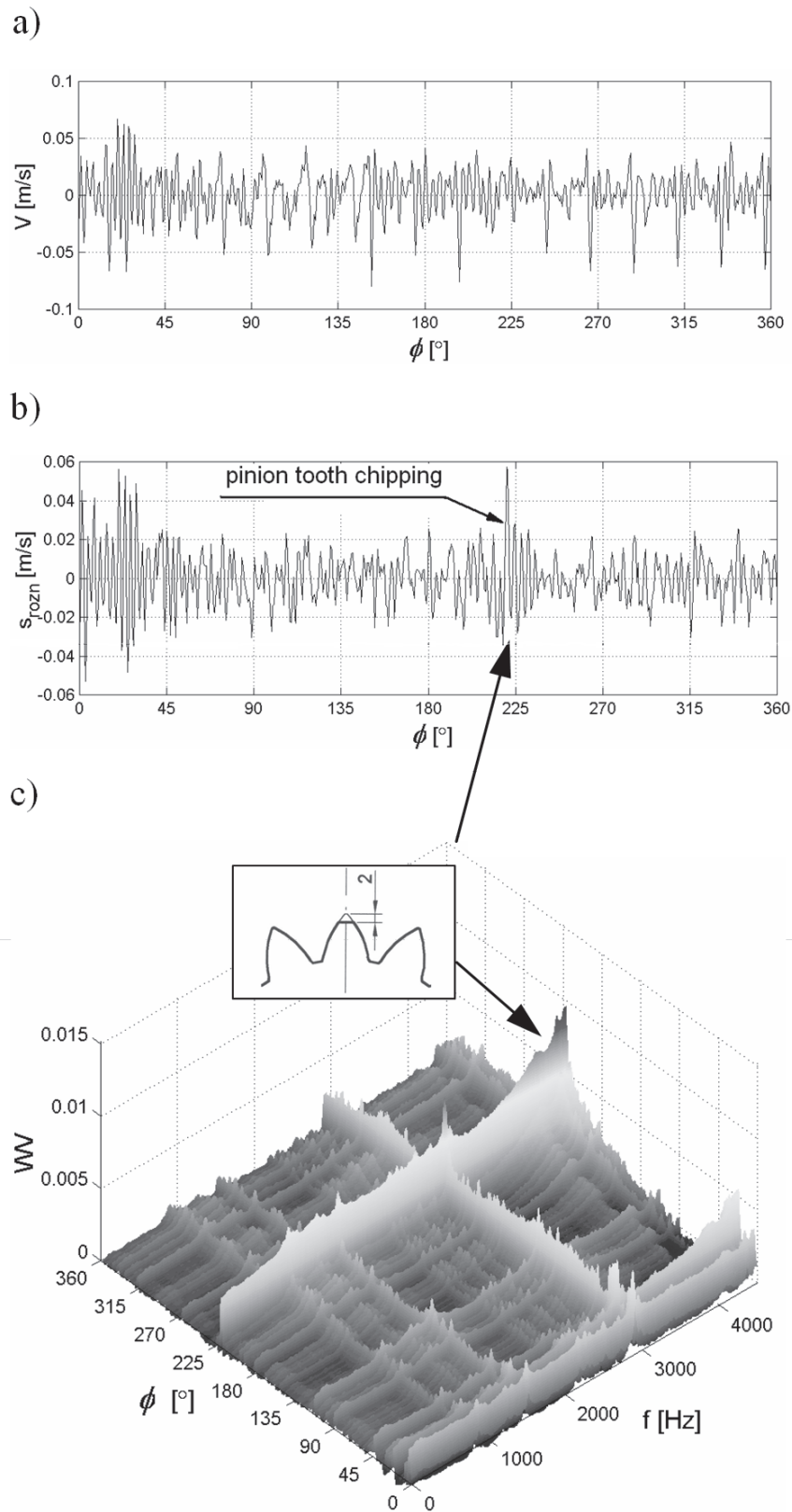
Analysis of the effect of the crack depth in the tooth root on a change in mesh rigidity was presented in monograph [13].

Faults of working surfaces of cooperating elements of rolling bearings were modeled in a similar way, by reducing the bearing rigidity while the damaged piece of surface was in the load transmission zone [13].

#### 4. Detection of tooth crest chipping

Initial phases of tooth crest chipping development in a toothed gear do not significantly influence the general level of vibration. Hence, detection of damages of this type in the early phase is very difficult. It appears from the previous research that the use of a contactless laser measurement of transverse vibration speed of rotating gear shafts, combined with advanced methods of signal processing, such as Wigner-Ville distribution (WV) or continuous wavelet transform (CWT), enables detecting such fault in its initial stage. This method of measurement eliminates the influence of complex transmittance of the bearing - gear casing system [13].

Fig. 3 shows the results of measured signal processing. In the time and frequency analysis WV distribution, an increase of amplitude occurs within the pinion turn angle corresponding to the cooperation of the damaged tooth.



Rys. 3. Wykruszenie zęba zębnika – 2 mm (czołowa liczba przyporu  $\epsilon_\alpha = 1,08$ ): sygnał prędkości drgań poprzecznych wału zębnika zmierzony w kierunku działania siły międzyzębnej (a), sygnał różnicowy (b), rozkład czasowo-częstotliwościowy WW sygnału różnicowego (c)

Fig. 3. Chip of the pinion tooth – 2 mm (contact ratio  $\epsilon_\alpha = 1,08$ ): measurement of vibration speed of pinion shaft in the direction of the force acting between the teeth (a), differential signal (b), WW Time/frequency distribution of differential signal (c)

cowego, występuje wzrost amplitudy w zakresie kąta obrotu zębniaka odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba.

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano sumowania dyskretnej wartości rozkładu WV (wzór 1):

$$S_{WV}(\varphi) = \sum_{k_{WV}=A}^B WV(l_{WV}, k_{WV}) \quad (1)$$

$$WV(l_{WV}, k_{WV}) = WV(t, f) \quad (2)$$

gdzie:  $l_{WV}, k_{WV}$  – dyskretne wartości odpowiednio czasu i częstotliwości,  $A, B$  – dyskretne wartości odpowiadające odpowiednio częstotliwościom granicznym przedziału sumowania  $f_A, f_B$ .

W przedstawionej na rys. 4, sumie rozkładu WV, wyraźnie widoczne są lokalne maksima pochodzące od wykruszenia wierzchołka zęba zębniaka, co ułatwia lokalizację uszkodzenia.

Sumy  $S_{WV}(\phi)$  rozkładów WV, uzyskane z pomiarów (rys. 4) i symulacji (rys. 5), wykazują wysoką zgodność.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przetwarzanie sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwia efektywne wy-

For easier interpretation of the results obtained, summation was performed of WV distribution discrete values (formula 1):

$$S_{WV}(\varphi) = \sum_{k_{WV}=A}^B WV(l_{WV}, k_{WV}) \quad (1)$$

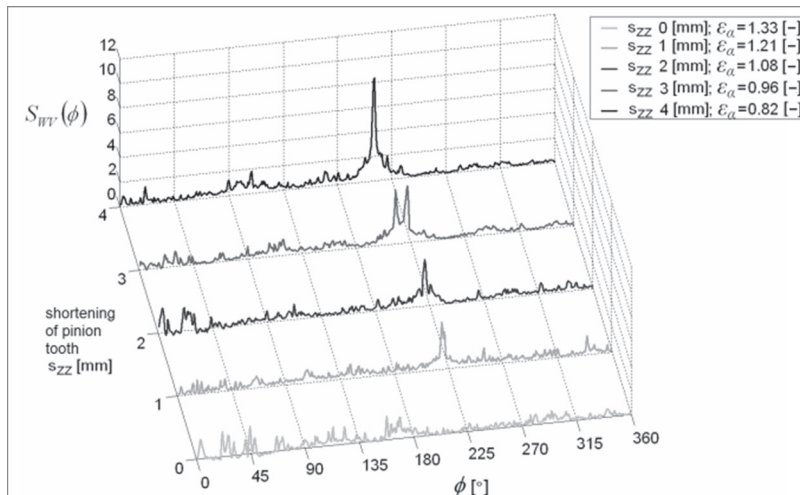
$$WV(l_{WV}, k_{WV}) = WV(t, f) \quad (2)$$

where:  $l_{WV}, k_{WV}$  – discrete values of time and frequency, respectively,  $A, B$  – discrete values corresponding, respectively, to limit frequencies of the summation interval  $f_A, f_B$ .

In the presented in fig. 4 sum of WV distribution, local maxima coming from the chipping of the tooth crest in the pinion are clearly visible, which facilitates localization of the fault.

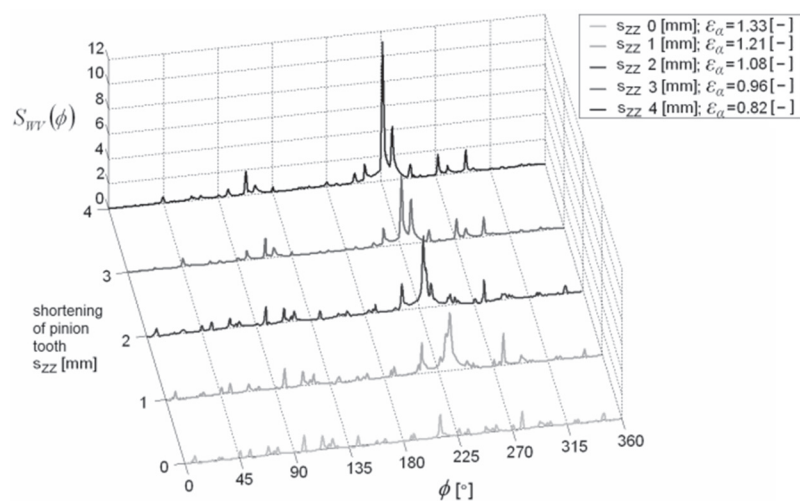
The sums  $S_{WV}(\phi)$  of WV distributions, obtained from measurements (fig. 4) and simulations (fig. 5) show high consistency.

Based on the research, it can be affirmed that processing of the signal of transverse vibration speed of gear shafts, measured in the direction of the force acting between the teeth, and the use of analyses in, simultaneously, time and frequency, or time and scale domains (CWT), facilitate effective detection of chipping of a tooth crest. Using the sums of WV distribution



Rys. 4. Suma rozkładu czasowo-częstotliwościowego WV w paśmie 0÷4500 [Hz] uzyskana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębniaka, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej – wynik badań doświadczalnych;  $\epsilon_\alpha$  – czołowa liczba przyporu

Fig. 4. The sum of time/frequency WV distribution in 0÷4500 [Hz] band, generated from a differential signal of pinion shaft vibration speed measured in the direction of the force acting between the teeth – experimental research result;  $\epsilon_\alpha$  – contact ratio



Rys. 5. Suma rozkładu czasowo-częstotliwościowego WV w paśmie 0÷4500 [Hz] wykonana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębniaka zarejestrowanego w kierunku działania siły międzyzębnej – wynik symulacji;  $\epsilon_\alpha$  – czołowa liczba przyporu

Fig. 5. The sum of time/frequency WV distribution in 0÷4500 [Hz] band, generated from a differential signal of pinion shaft vibration speed recorded in the direction of the force acting between the teeth – simulation result;  $\epsilon_\alpha$  – contact ratio

krywanie wykruszenia wierzchołka zęba. Wykorzystując sumy rozkładu WV (rys. 4, 5) lub skalogramy [13] zbudowano miary pozwalające ocenić głębokość wykruszenia zęba.

Symulacje komputerowe pracy przekładni zębatej z uszkodzonymi elementami, wykonane przy użyciu rozbudowanego i zidentyfikowanego jej modelu dynamicznego, umożliwiły zweryfikowanie miar w przypadku występowania wykruszeń wierzchołka zęba podczas pracy przekładni: o różnych parametrach geometrycznych kół zębatych, przy różnych prędkościach obrotowych, obciążeniach oraz odchyłkach wykonania kół.

### 5. Neuronowy klasyfikator uszkodzeń kół zębatych

Wyniki badań związanych z budową klasyfikatorów neuronowych, które były uczone i sprawdzane na danych uzyskanych z modelu symulacyjnego przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym przedstawiono w monografii [3].

Do budowy wzorców wykorzystano sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła analizowane przy pomocy FFT (Fast Fourier Transform) oraz CWT (rys. 6).

Ciągła transformata falkowa (CWT) jest zdefiniowana:

$$C_f(a, b, \psi) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

gdzie:  $a$  – współczynnik skali,  $b$  – parametr przesunięcia w dziedzinie czasu,  $\psi$  – funkcja bazowa, falka,  $\psi^*$  – falka zespolona.

Na podstawie badań wstępnych, wybrano jako klasyfikator, sztuczną sieć neuronową, typu MLP (Multi Layer Perceptron). Zestawy wzorców zbudowano w oparciu o sygnały drganiowe przekładni zębatej pracującej w następujących warunkach:

- $M = 138$  [Nm],  $n = 900$  [r.p.m.],
- $M = 138$  [Nm],  $n = 1800$  [r.p.m.],
- $M = 206$  [Nm],  $n = 900$  [r.p.m.],
- $M = 206$  [Nm],  $n = 1800$  [r.p.m.].

Zbudowano klasyfikator neuronowy zdolny rozróżnić stopień uszkodzenia zębów w postaci pęknięcia u podstawy zęba i wykruszenia wierzchołka zęba przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych momentach obciążenia.

(Fig. 4, 5) or scalograms [13], measures were built enabling the evaluation of the tooth chip depth.

Computer simulations of a toothed gear with damaged components, made using its expanded and identified dynamic model, made it possible to verify the measures of the case of tooth crest chipping during the operation of gears of different geometrical parameters of toothed wheels, at different rotational speeds, loads or deviations in wheel workmanship.

### 5. Neuron classifier of toothed wheel fault

The results of research connected with the structure of neuron classifiers, which were taught and verified on the basis of data obtained from a simulation model of a toothed gear working in a power transmission system, were presented in monograph [3].

For constructing the models, signals of transverse vibration speed of wheel shaft, analyzed by means of FFT (Fast Fourier Transform) and CWT (fig. 6) were used.

The Continuous Wavelet Transform CWT of the signal is defined:

$$C_f(a, b, \psi) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

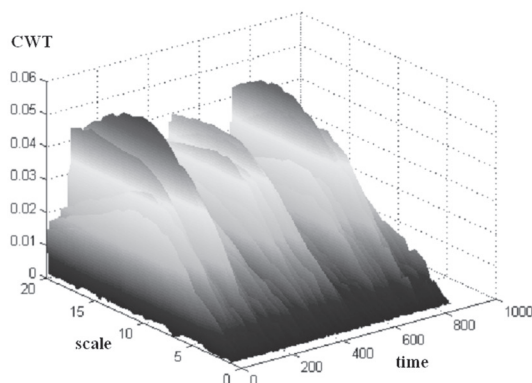
where:  $a$  – the scale parameter,  $b$  – the time parameter,  $\psi$  – the analyzing wavelet,  $\psi^*$  – the complex conjugate of  $\psi$ .

Based on preliminary tests, an artificial neuron network of MLP (Multi Layer Perceptron) type was chosen as the classifier. Sets of models were built on the basis on vibration signals of a toothed gear working in the following conditions:

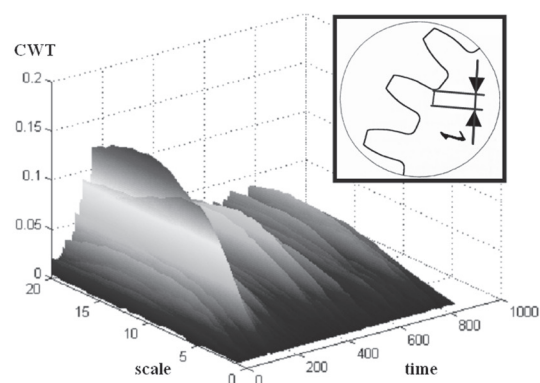
- $M = 138$  [Nm],  $n = 900$  [r.p.m.],
- $M = 138$  [Nm],  $n = 1800$  [r.p.m.],
- $M = 206$  [Nm],  $n = 900$  [r.p.m.],
- $M = 206$  [Nm],  $n = 1800$  [r.p.m.].

A neuron classifier was built, capable of recognizing the degree of fault in wheel teeth in the form of a crack at the tooth bottom or chipping of tooth crest in a gear working at different shaft speeds and different load torques.

a)



b)



Rys. 6. Ciągła transformata falkowa (CWT) sygnału otrzymanego na podstawie modelu symulacyjnego: przekładnia bez uszkodzeń (a), pęknięcie podstawy zęba  $l = 3$  mm (b)

Fig. 6. Continuous Wavelet Transform CWT of signals obtained from a simulation model: gear without defects (a), a crack at the tooth bottom  $l = 3$  mm (b)

Założono, że będą rozpoznawane następujące klasy:

- pęknięcie u podstawy zęba w postaci procentowego zmniejszenia sztywności pary zębów w przypadku wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia:
  - klasa 1  $\Rightarrow$  0  $\Rightarrow$  9%,
  - klasa 2  $\Rightarrow$  10  $\Rightarrow$  19%,
  - klasa 3  $\Rightarrow$  20  $\Rightarrow$  29%,
  - klasa 4  $\Rightarrow$  30  $\Rightarrow$  40%,
- wykruszenie wierzchołka zęba w postaci procentu długości podziałki o jaki zmniejsza się odcinek przyporu w wyniku wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia:
  - klasa 5  $\Rightarrow$  0  $\Rightarrow$  9%,
  - klasa 6  $\Rightarrow$  10  $\Rightarrow$  19%,
  - klasa 7  $\Rightarrow$  20  $\Rightarrow$  29%,
  - klasa 8  $\Rightarrow$  30  $\Rightarrow$  40%,

Proces uczenia, walidacji testowania przedstawiono na rys. 7.

Zarówno w przypadku wykorzystania wzorców otrzymanych przy wykorzystaniu analiz FFT, jak również analizy CWT, udało się zbudować klasyfikatory neuronowe diagnozujące rodzaj i stopień uszkodzenia zęba koła przekładni z błędem walidacji poniżej 5%.

Niezależnie od sposobu budowy wzorców, błąd testowania na danych pochodzących z rzeczywistej przekładni, wyniósł około 60%.

W kolejnym etapie, oprócz danych pochodzących z modelu dynamicznego przekładni, do zbioru uczącego, dołączono część danych pochodzących z badań rzeczywistej przekładni.

Uzyskana w tym przypadku wartość błędu testowania wyniosła około 20% zarówno w przypadku wykorzystania do budowy warstw ukrytych neuronów typu sigmoidalnego, jak również tangensoidalnego [3].

Przeprowadzone badania pokazały, że możliwe jest zbudowanie klasyfikatora neuronowego dwóch rodzajów uszkodzeń zębów kół w różnych stanach zaawansowania dla przekładni pracującej z różnymi prędkościami obrotowymi wałów oraz pod różnym momentem obciążenia.

It was assumed that the following classes would be recognized:

- a crack at the tooth bottom in the form of percentage reduction of rigidity of a couple of teeth in case of such fault:
  - class 1  $\Rightarrow$  0  $\Rightarrow$  9%,
  - class 2  $\Rightarrow$  10  $\Rightarrow$  19%,
  - class 3  $\Rightarrow$  20  $\Rightarrow$  29%,
  - class 4  $\Rightarrow$  30  $\Rightarrow$  40%,
- chipping of tooth crest, in the form of per cent length of pitch, by which the tooth contact section shortens as a result of such fault:
  - class 5  $\Rightarrow$  0  $\Rightarrow$  9%,
  - class 6  $\Rightarrow$  10  $\Rightarrow$  19%,
  - class 7  $\Rightarrow$  20  $\Rightarrow$  29%,
  - class 8  $\Rightarrow$  30  $\Rightarrow$  40%,

The training process and the testing validation process are presented in fig. 7.

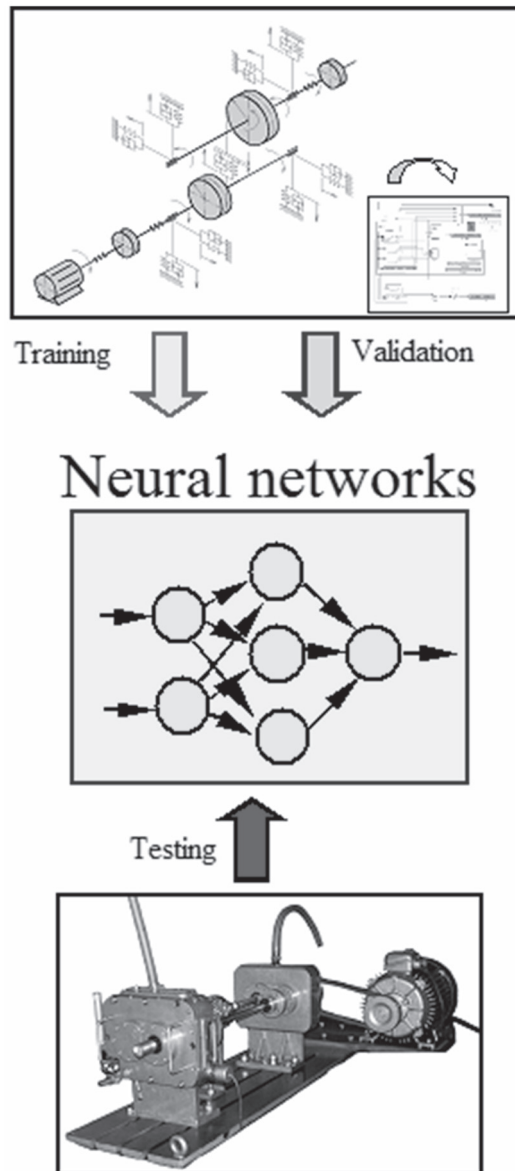
When using both, the models obtained from FFT analysis and CWT analysis, the authors managed to build neuron classifiers which can diagnose the type and degree of fault of a gear wheel tooth with a validation error below 5%.

Irrespective of the model building method, the testing error for data taken from a real gear was ca. 60%.

In the successive stage, apart from data taken from a dynamic model of a gear, part of data coming from tests of a real gear were added to the training set.

The testing error value obtained in that case was ca. 20% in the case where for the construction, layers of both sigmoidal and tangensoidal hidden neurons were used [3].

The research has shown that it is possible to build a neuron classifier of two fault types of wheel teeth in different stages of advancement for a gear working at different rotational speeds of shaft and with different load torques.



Rys. 7. Schemat przyjętej metodologii pracy z klasyfikatorami neuronowymi

Fig. 7. Chart of the adopted methodology of working with neuron classifiers



## 6. Wnioski

Głównymi problemami w dziedzinie eksploatacji układów napędowych jest zapewnienie ich wysokiej niezawodności i gotowości [6]. Rosnące wymagania, co do trwałości i niezawodności układów napędowych maszyn i urządzeń powodują, że istnieje konieczność pozyskiwania informacji o ich stanie podczas eksploatacji [1]. W procesie eksploatacji współczesnych układów napędowych, wykorzystuje się szereg różnych metod i technik, służących do wykrywania wczesnych stadiów uszkodzeń oraz zwiększenia ich sprawności i niezawodności. Niewykryte w porę uszkodzenia rozwijają się, stając się przyczyną powstawania uszkodzeń przekładni zębatych, zagrażających niezawodności układów napędowych.

Na podstawie badań własnych można sformułować następujące wnioski:

- Zastosowane metody przetwarzania sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, mierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwia efektywne wykrywanie różnych uszkodzeń kół zębatych.
- Użycie rozbudowanego, zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębatej, pracującej w układzie napędowym, do symulacji uszkodzeń jej elementów, umożliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych.
- Równoczesne wykorzystanie metod doświadczalnych i symulacji komputerowych, umożliwiło stworzenie danych wejściowych do systemu diagnozującego lokalne uszkodzenia kół, działającego w oparciu o metody sztucznej inteligencji.
- Najwyższą poprawnością klasyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni charakteryzują się sztuczne sieci neuronowe, uczone na danych otrzymanych z modelu oraz z rzeczywistej przekładni.

## 7. References

1. Batko W., Borkowski B., Głocki K. Application of database systems in machine diagnostic monitoring. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 1(37): 7-10.
2. Belsak A., Flasker J. Wavelet analysis for gear crack identification. *Engineering Failure Analysis* 2009; 16(6): 1983-1990.
3. Czech P., Łazarz B., Wojnar G. Wykrywanie lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i algorytmów genetycznych. Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2007.
4. Dąbrowski Z. Różne metody diagnozowania przekładni zębatych na podstawie pomiaru drgań i hałasu. XXII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 1995: 35-44.
5. Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A. Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym. Warszawa-Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2000.
6. Drożdżel P. The influence of the vehicle work organization conditions on the engine start-up parameters. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 1(37): 72-74.
7. Inalpolat M., Kahraman A. A dynamic model to predict modulation sidebands of a planetary gear set having manufacturing errors. *Journal of Sound and Vibration* 2010; 329(4): 371-393.
8. Lebold M., McClintic K., Campbell R., Byington C., Maynard K. Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics. 54th Meeting of Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach 2000: 623-634.
9. Łazarz B. Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2001.
10. Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G. Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2006.
11. Łazarz B., Wojnar G. Detection of Early Stages of Pinion Tooth Chipping in Transmission Gear. *Machine Dynamics Problems* 2003; 27(3): 23-34.

## 6. Conclusions

The main issues connected with operation of the power transmission systems is ensuring their high reliability and readiness for operation [6]. Increasing requirements regarding durability and reliability of the power transmission systems, make it necessary to acquire information on the condition of the engine during its operation [1]. Power transmission systems maintenance programmes incorporate various methods and techniques for early fault detection to maintain efficiency and high reliability. The faults did not detect in due time, they would develop becoming the reason of the gearbox failures, which are dangerous for the power transmission systems.

On the basis of the authors' own studies, the following conclusions can be formulated:

- The methods applied to process the signal of transverse vibration speed of shafts, measured in the direction of the force acting between the teeth, and the use of analyses in, simultaneously, time and frequency or time and scale domains (CWT), facilitate effective detection of various faults of toothed wheels.
- Application of an expanded and identified dynamic model of a gearbox working in a power transmission system for simulating the faults of its components enables the acquisition of credible diagnostic relations.
- The simultaneous application of experimental methods and computer simulations has facilitated the creation of input data to the system diagnosing local damage of wheels, working based on artificial intelligence methods.
- The artificial neuron networks, taught using data obtained from the model and from a real gearbox, offer the highest correctness of classification of the type and degree of fault in gears.

12. Łazarz B., Wojnar G. Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą. XVII Ogólnopolska Konferencja PRZEKŁADNIE ZĘBATE, Węgierska Górka 2000: 101-108.
13. Łazarz B., Wojnar G., Czech P. Wibrometria laserowa i modelowanie-narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2007.
14. Madej H. Wykorzystanie sygnału resztkowego drgań w diagnostyce przekładni zębatych. Diagnostyka 2002; 26: 46-52.
15. Müller L. Przekładnie zębate – dynamika. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
16. Sawalhi N., Randall R. B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults: Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults. Mechanical Systems and Signal Processing 2008; 22(8): 1924-1951.
17. Shao Y., Li X., Mechefske K. C., Chen Z. Rear axle gear damage prediction using vibration signal preprocessing coupled with RBF neural networks. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2009; 4(44): 57-64.
18. Stewart R. M. Some useful data analysis techniques for gearbox diagnostics. Report MHM/R/10/77. Machine Health Monitoring Group. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton 1977.
19. Wang X., Makis V. Autoregressive model-based gear shaft fault diagnosis using the Kolmogorov–Smirnov test. Journal of Sound and Vibration 2009; 327(3-5): 413-423.
20. Wang W., Kanneg D. An integrated classifier for gear system monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing 2009; 23(4): 1298-1312.
21. Wilk A., Łazarz B., Madej H. Metody wczesnego wykrywania uszkodzeń w przekładniach zębatych. Przegląd Mechaniczny 2002, 3: 14-18.
22. Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G. Analiza zmian wibroakustycznych symptomów diagnostycznych w procesach zużyciowych kół zębatych. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2003.
23. Wu J. D., Chan, J. J. Faulted gear identification of a rotating machinery based on wavelet transform and artificial neural network. Expert Systems with Applications: An International Journal 2009; 36(5): 8862-8875.

---

**Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ, Prof. nzw. w Pol. Śl.**

**Dr inż. Grzegorz WOJNAR**

**Dr inż. Piotr CZECH**

Wydział Transportu

Politechnika Śląska

Ul. Krasińskiego nr 8, 40-019 Katowice, Polska

e-mail: boguslaw.lazarz@polsl.pl, grzegorz.wojnar@polsl.pl, piotr.czech@polsl.pl

---