

Grzegorz PERUŃ, Bogusław ŁAZARZ, Grzegorz WOJNAR, Piotr CZECH

## MODEL DYNAMICZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO JAKO ŹRÓDŁO DANYCH WEJŚCIOWYCH DLA KLASYFIKATORÓW NEURONOWYCH

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono metodologię wykorzystania modelu dynamicznego jako bazy w badaniach sieci neuronowych. Zidentyfikowany model dynamiczny układu napędowego posłużył jako źródło otrzymywania danych wejściowych dla sieci neuronowych.

## THE TOOTHED GEAR OF DYNAMIC MODEL AS A BASE OF INPUT DATA FOR THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

**Summary.** The work presents methodology of using dynamic model of the toothed gear as a base in research of artificial neural networks. The identified dynamic model of toothed gear in power transmission system was used as a generator of input data for neural network applications.

### 1. WPROWADZENIE

Szybki i wielokierunkowy rozwój metodologii diagnostycznej w ostatnich latach spowodował powstanie nowych metod stosowanych w systemach lokalizacji uszkodzeń oraz rozpoznawania stanu obiektów [10]. Zaczęto interesować się zastosowaniem sztucznej inteligencji w diagnozowaniu stanu urządzeń [1,4,5,6]. Jedną z metod należącą do tej grupy są sztuczne sieci neuronowe, które znajdują zastosowanie w coraz to nowych obszarach wiedzy. Sieci neuronowe należą do wyrafinowanych technik modelowania, zdolnych do odwzorowania nadzwyczaj złożonych funkcji z dużą liczbą zmiennych niezależnych [8].

Zasada działania sztucznych sieci neuronowych oparta jest na pracy mózgu człowieka [8].

Sztuczna sieć neuronowa składa się z połączonych ze sobą elementów, zwanych neuronami.

Aby móc korzystać ze sztucznej sieci neuronowej, należy ją wyposażyć w wiedzę, odpowiednią do zadania, jakie ma spełniać. Proces ten nosi nazwę uczenia sieci. W procesie tym każdemu z neuronów muszą zostać pokazane dane uczące, od których jakości zależą późniejsze efekty otrzymane w wyniku działania sieci neuronowych [8].

Zgodnie z bibliografią [8] ilość danych wejściowych musi być co najmniej 10-krotnie większa niż złożoność sieci (liczba wag połączeń). W praktyce, często niemożliwością jest

zebranie z rzeczywistego obiektu badań tak dużej ilości danych. Konieczne wydaje się więc poszukiwanie innych metod pozyskiwania potrzebnej ilości danych, które zostaną wykorzystane jako dane wejściowe dla sztucznych sieci neuronowych.

## 2. MODEL UKŁADU NAPĘDOWEGO Z PRZEKŁADNIĄ ZĘBATĄ

Autorzy prowadzą prace, których celem jest identyfikacja uszkodzeń w przekładniach zębatych już we wczesnych stadiach ich rozwoju [1,4,5,6,10].

Jedną z metod, nad którą trwają prace, jest wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej w zadaniu klasyfikacji stopnia uszkodzenia zębów [1,4,5,6].

Ponieważ nie jest możliwe zebranie wystarczającej do uczenia sieci neuronowej ilości przykładów uszkodzeń zębów, opracowano metodę opartą na modelu przekładni zębatej.

W literaturze można spotkać wiele różnego rodzaju modeli przekładni zębatej [2]. Można zauważyć tutaj dwutorowość prac. Pierwszy kierunek prac opiera się na dokładnej analizie odizolowanego od układu napędowego modelu przekładni zębatej. Jedynymi przyczynami obciążeń dynamicznych są źródła wewnętrzne, przy stałym obciążeniu zewnętrznym [2]. Do grupy tej należą modele Bollingera i Bosha, Rettiga, Kowalewa, modele palisadowe, modele oparte na metodzie interferencji pozornej [2]. Do drugiego kierunku prac należą badania własności dynamicznych całych układów napędowych złożonych z przekładni zębatej, silnika napędowego, maszyny roboczej, sprzęgieł, wałów [2]. Do najważniejszych modeli należących do tej grupy należy wymienić model Nadolskiego, Grybosia, Pfeiffera, Boscha, Marchelka [2].

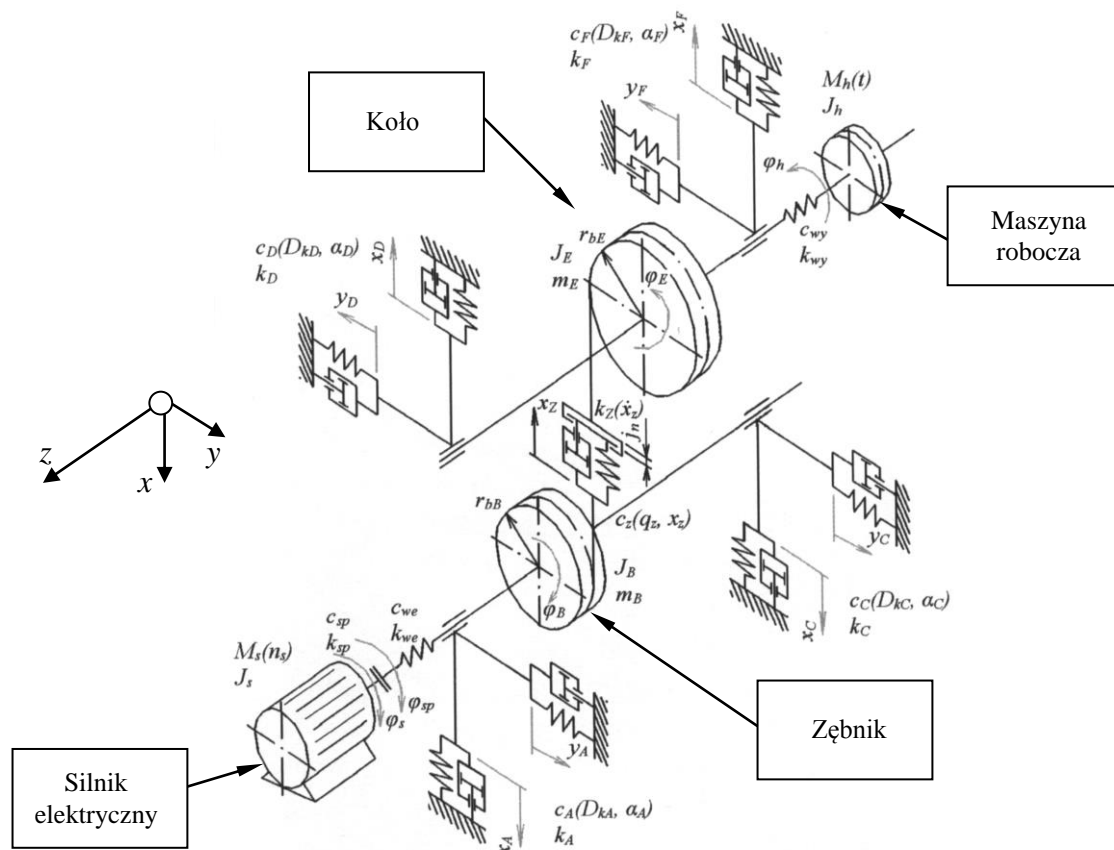
Rozwój specjalistycznego oprogramowania komputerowego i wiedzy na temat czynników mających wpływ na dynamikę przekładni zębatych pozwala na zbudowanie modelu dynamicznego układu napędowego łączącego zalety obu wyżej wymienionych kierunków prac. Model taki powinien uwzględniać zarówno procesy zachodzące w całym układzie napędowym, jak i parametry samego zazębienia przekładni zębatej pracującej w tym układzie [3].

W badaniach wykorzystano model opracowany i zidentyfikowany w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych [3,7,9,11,12].

Na rysunku 1 przedstawiono model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą, wykorzystany w zaproponowanej metodzie [1,3,7,9,11,12]. Model przedstawia układ napędowy składający się z jednostopniowej przekładni zębatej, elektrycznego silnika asynchronicznego, maszyny roboczej, sprzęgieł łączących wały. Zaadoptowano w nim model zazębienia zgodny z modelem Müllera [2].

W globalnym układzie współrzędnych przyjęto kierunek osi „z” zgodny z kierunkiem osi wałów przekładni, kierunek osi „y” zgodny z kierunkiem siły stycznej w zazębieniu, kierunek osi „x” skierowany zgodnie z kierunkiem siły normalnej w zazębieniu.

Zidentyfikowany model układu napędowego z przekładnią zębatą stanowi system pozyskiwania danych wejściowych dla sztucznych sieci neuronowych.



Rys. 1. Model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym  
 Fig. 1. Dynamic model of gearbox in power transmission system

### 3. OBIEKT BADAŃ

Obiekt badań stanowiła przekładnia zębata pracująca w układzie napędowym. W badaniach posłużono się zidentyfikowanym modelem takiej przekładni [1,3,7,9,11,12]. Parametry badanej przekładni zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1  
 Parametry badanej przekładni zębatej

Parametr	Wartość
Liczba zębów zębniaka	16
Liczba zębów koła	24
Szerokość kół	20 mm
Moduł normalny	4,5 mm
Współczynnik korekcji zębniaka	0,86
Współczynnik korekcji koła	-0,5
Nominalny kąt przyporu	20°
Kąt pochylenia linii zęba	0°
Całkowity wskaźnik przyporu	1,32

Współczynnik wysokości głowy zęba	1
Współczynnik luzu wierzchołkowego	0,25
Odległość osi kół	91,5 mm
Materiał kół	20H2N4A
Twardość kół	60 HRC

#### 4. OPIS METODY POZYSKIWANIA DANYCH UCZĄCYCH

Podstawą metody stosowanej w badaniach [1,4,5,6] jest zidentyfikowany model przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym [3].

Metodologia badań zakłada, że model przekładni zębatej odzwierciedla na zadowalającym poziomie rzeczywisty obiekt badań. Przy takim założeniu możliwe jest pozyskanie wystarczającej liczby zestawów danych uczących właśnie przez wykorzystanie modelu przekładni.

Podstawą do otrzymania danych uczących dla sztucznych sieci neuronowych jest zasymulowany sygnał prędkości drgań poprzecznych wału koła. Wybrany sygnał jest zgodny z sygnałem możliwym do otrzymania z rzeczywistej przekładni zębatej pracującej w układzie mocy krążącej. Wybór ten umożliwi późniejszą weryfikację działania sieci neuronowych na sygnale zmierzonym na stanowisku mocy krążącej.

W celu uzyskania wystarczającej liczby sygnałów zasymulowano pracę przekładni w trzech seriach.

Seria pierwsza zakłada pracę bezbłędnej przekładni:

- błąd cykliczny dla zębniaka: 0  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błąd cykliczny dla koła: 0  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania zębniaka: 0  $\mu\text{m}$ ,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania koła: 0  $\mu\text{m}$ .

Seria druga, odpowiadająca pracy przekładni wykonanej w 5 klasie dokładności wykonania:

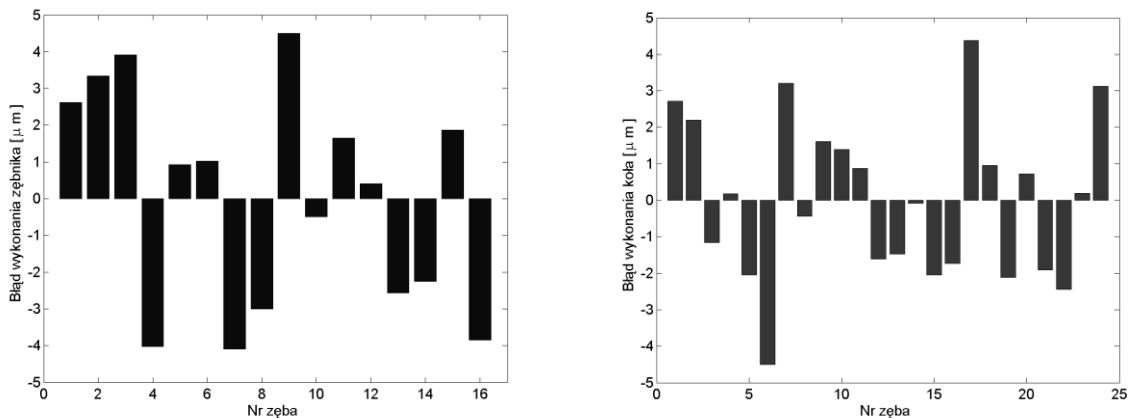
- błąd cykliczny dla zębniaka: -7  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błąd cykliczny dla koła: 5  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania zębniaka:  $\pm 4,5 \mu\text{m}$ ,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania koła:  $\pm 4,5 \mu\text{m}$ .

Seria trzecia, odpowiadająca pracy przekładni wykonanej w 6 klasie dokładności wykonania:

- błąd cykliczny dla zębniaka: -14  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błąd cykliczny dla koła: 10  $\mu\text{m}$ /długość podziałki,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania zębniaka:  $\pm 9 \mu\text{m}$ ,
- błędy losowe  $\rightarrow$  maksymalny błąd wykonania koła:  $\pm 9 \mu\text{m}$ .

W celu zwiększenia ilości danych niezbędnych do uczenia sieci, serię drugą i trzecią powtórzono pięciokrotnie przy różnych błędach losowych.

Przykładowy rozkład błędów losowych dla zębniaka i koła wykonanych w 5 klasie dokładności przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład rozkładu błędów losowych – 5 klasa dokładności wykonania

Fig. 2. The example of schedule of random fault – 5 grades of gears

Zasymulowano pracę przekładni zębatej pracującej przy dwóch prędkościach obrotowych wału koła:

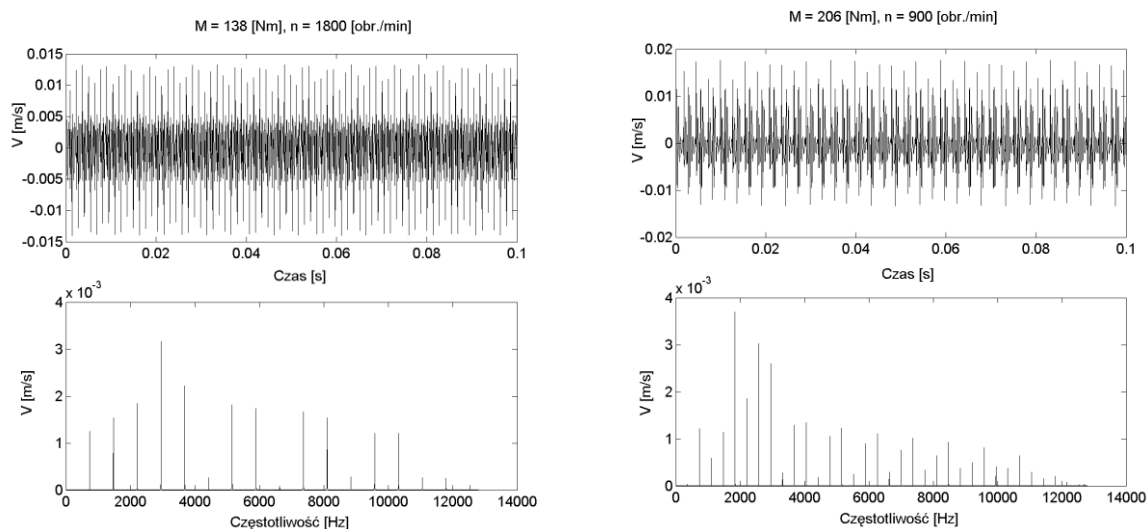
- $n = 900$  [obr./min] ( $f = 15$  [Hz]),
- $n = 1800$  [obr./min] ( $f = 30$  [Hz]),

i dwóch obciążeniach:

- $M = 138$  [Nm] ( $Q = 2,58$  [MPa]),
- $M = 206$  [Nm] ( $Q = 3,85$  [MPa]).

Każdy z wariantów symulowano dla odchyłek wykonania przekładni zębatej zgodnie z procedurą opisaną powyżej.

Wartości prędkości obrotowych i obciążeń dobrano tak, aby możliwe było porównanie sygnałów otrzymanych z symulacji z sygnałami zmierzonymi na stanowisku mocy krążącej. Przykładowe sygnały prędkości poprzecznych wału koła dla przekładni idealnej (bezbłędnej) przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Prędkość drgań poprzecznych wału koła – przekładnia bezbłędna

Fig. 3. Transversal vibration velocity signals – faultless gearbox

Dodatkowo dla każdego z przypadków przeprowadzono symulację z lokalnym uszkodzeniem zęba. Zasymulowano dwa rodzaje uszkodzeń o różnym stopniu zaawansowania, w postaci pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba.

Wystąpieniu uszkodzenia zęba w postaci pęknięcia u jego podstawy towarzyszy lokalna zmiana sztywności zazębienia. Własność tę wykorzystano przy implementacji tego typu uszkodzenia w modelu przekładni [12]. Pęknięcie u podstawy zęba zostało zamodelowane jako procentowe zmniejszenie sztywności pary zębów w stosunku do przekładni bez uszkodzeń. Uszkodzenie zęba w postaci wykruszenia wierzchołka odwzorowano jako zmianę odcinka przyporu. W przypadku uszkodzenia zęba zębownika następuje wcześniejsze zakończenie przyporu, natomiast dla uszkodzenia zęba koła współpraca zębów jest opóźniona [12].

Sygnaly otrzymane z symulacji po odpowiedniej obróbce i ekstrakcji residuów stanowią podstawę systemu otrzymywania danych wejściowych dla sieci neuronowych. W pracach [1,4,5,6] tak otrzymane dane są wykorzystywane w neuronowych klasyfikatorach stopnia lokalnych uszkodzeń przekładni zębatej.

## Bibliografia

1. Czech P.: Wykrywanie uszkodzeń przekładni zębatych za pomocą metod sztucznej inteligencji. Rozprawa doktorska, Katowice 2006.
2. Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym. ITE, Radom 2000.
3. Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
4. Łazarz B., Czech P.: Optymalizacja sieci neuronowej typu SVM w zadaniu identyfikacji stopnia pęknięcia zęba. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport, z. 50/2003.
5. Łazarz B., Czech P.: Wykorzystanie sieci neuronowych do identyfikacji pęknięcia stopy zęba. „Diagnostyka”, Vol. 31/2004.
6. Łazarz B., Madej H., Czech P.: Ciągła transformata falkowa jako podstawa klasyfikatora neuronowego typu SVM. XXXII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Górka 2005.
7. Łazarz B., Wojnar G.: Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą. XVII Ogólnopolska Konferencja „Przekładnie Zębate”, Węgierska Górka 2000.
8. Nałęcz M., Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
9. Peruń G.: Model dynamiczny układu napędowego. Praca dyplomowa magisterska, Katowice 2004.
10. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Vibration Processing Techniques for Fault Detection in Gearboxes. ASME 2003. Chicago, Illinois, USA, 2003.
11. Wojnar G.: Model dynamiczny układu napędowego złożonego z silnika asynchronicznego, przekładni zębatej oraz maszyny roboczej. Praca dyplomowa magisterska, Katowice 2000.
12. Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Katowice 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski