



Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

NA TEMAT:

„Wykrywanie i identyfikacja uszkodzeń złożonego układu elektromechanicznego w ich początkowej fazie powstawania metodami falkowo-neuronowymi”

AUTOR

mgr inż. Marcin Tomczyk

PROMOTOR

dr hab. inż. Mieczysław Zając, prof. PK

Kraków 2018

Spis treści

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń	3
Symbole.....	3
Symbole greckie	3
1. Wstęp.....	4
2. Określenie celu i tezy pracy.	5
3. Charakterystyka poszczególnych rozdziałów rozprawy.	6
4. Metodologia modelowania układu elektromechanicznego ze zmieniającymi się wartościami parametrów opisujących nieliniowości.	8
4.1. Przedstawienie zastosowanego modelu napędu z silnikiem indukcyjnym.	8
4.2. Przedstawienie zastosowanych modeli tłumienia nieliniowego.....	9
4.3. Uwzględnienie obecności luzu w połączeniach mechanicznych.	11
4.4. Przedstawienie skokowych zmian identyfikowanych uszkodzeń i stref luzu zastosowanych w badaniach.....	13
5. Przedstawienie wyników przeprowadzonych badań identyfikacji uszkodzeń oraz wpływających z nich wniosków.	17

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń

Symbole

a_c	– przyspieszenie liniowe masy członu dynamicznego masowo–tłumiąco-sprężystego [m/s ²]
a_s	– przyspieszenie liniowe na obwodzie koła pędnego wirnika silnika [m/s ²]
c	– współczynnik tarcia wiskotycznego [N·s/m]
c_l	– współczynnik nieciągłości w zerze (tarcie Coulomba)
J_p	– masowy moment bezwładności zredukowany na kole pędnym maszyny roboczej [kg·m ²]
J_s	– masowy moment bezwładności zredukowany na wał silnika [kg·m ²]
k	– współczynnik sprężystości [N/m]
K_3	– macierz zawierająca szerokości strefy luzu
K_4	– macierz zawierająca masowe momenty bezwładności zredukowane na wale silnika
m	– masa członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [kg]
m_{el}	– moment elektromagnetyczny silnika [N·m]
n_l	– wskaźnik płynięcia dla cieczy pseudo-plastycznej
r	– promień koła pędnego maszyny roboczej [m]
r_s	– względna rezystancja obwodu stojana [Ω]
r_w	– względna rezystancja obwodu wirnika [Ω]
T_m	– mechaniczna stała czasowa [s]
v_c	– prędkość liniowa masy członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m/s]
x_c	– droga liniowa przebyta przez masę członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m]
x_m	– względna reaktancja obwodu rozproszonego
x_p	– droga liniowa przebyta przez masy wirujące koła pędnego maszyny roboczej [m]
x_r	– droga liniowa przebyta przez masy wirujące związane z wirnikiem silnika [m]
x_s	– względna reaktancja rozproszenia obwodu stojana
x_w	– względna reaktancja rozproszenia obwodu wirnika

Symbole greckie

α_c	– kąt zmiany położenia masy członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [rad/s]
α_p	– kąt obrotu mas wirujących koła pędnego maszyny roboczej [rad/s]
α_s	– kąt obrotu mas wirujących silnika [rad/s]
η_k	– współczynnik konsystencji (lepkości pozornej) [Pa·s ^{n₁}]
σ	– naprężenie ścinające [Pa]
ω_p	– prędkość kątowa koła pędnego maszyny roboczej [rad/s]
ω_s	– prędkość kątowa wirnika silnika [rad/s]

1. Wstęp.

Rejestrowane w czasie rzeczywistym sygnały układów elektromechanicznych, zarówno elektryczne, jak i mechaniczne, zazwyczaj zawierają istotne informacje o stanie tych układów oraz o zachodzących w nich procesach fizycznych, mogących być symptomami pojawiających się uszkodzeń. W złożonych układach elektromechanicznych, zawierających silne nieliniowości, i działających w warunkach istnienia zakłóceń, dostęp do tych informacji jest zwykle bardzo trudny i wymaga stosowania specjalistycznego aparatu badawczego. Finalnym celem takiego działania powinno być zapewnienie efektywnego przebiegu procesu wnioskowania diagnostycznego poprzez szybkie wyodrębnienie tych informacji.

Wymienione ograniczenia sprawiają, że wybór aparatu badawczego jest bardzo istotny. W rozprawie tej badania charakteru sygnałów przeprowadzono jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości, co zwiększyło efektywność selekcji zawartych w tych sygnałach informacji. Wybór ten był podyktowany dogłębną analizą istniejącego stanu wiedzy, która wykazała, że analiza czasowo-częstotliwościowa stanowi skuteczne narzędzie monitorowania i diagnostyki niestacjonarnych stanów dynamicznych, które zazwyczaj są efektem występowania silnych nieliniowości (luzów, nieciągłości charakterystyk tłumienia, czy skokowych zmian momentu bezwładności). Należy podkreślić, że niejednokrotnie pierwsze symptomy pojawiających się uszkodzeń są trudne do wykrycia przy zastosowaniu klasycznych metod fourierowskich wskutek rozmycia widm stanów niestacjonarnych. W realizacji pracy przyjęto, że analiza wrażliwości układu na niewielkie skokowe zmiany wartości wybranych parametrów układu może być pierwszym etapem badań takich stanów.

Drugim etapem rozprawy jest wykorzystanie metod inteligencji obliczeniowej do analizy reprezentacji falkowych sygnałów układu elektromechanicznego, uzyskanych w pierwszym etapie. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zastosowanie metody sieci neuronowych, a także metody grupowania danych pozwala na wydatne zwiększenie efektywności wykorzystania informacji zawartej w rozkładach współczynników falkowych i skalogramach.

W pracy tej przedstawiono wyniki badań:

- wrażliwości wybranych sygnałów układu elektromechanicznego na skokową zmianę wartości parametru silnika w modelu złożonego układu elektromechanicznego (zawierającego sprężystość połączeń mechanicznych oraz element tłumiący o charakterystyce nieliniowej) zarówno zawierającego, jak i nie zawierającego stref luzu,

- przeprowadzono identyfikację szerokości strefy luzu zarówno w pozbawionym szumu jak i w zaszumionym modelu złożonego układu elektromechanicznego,
- zastosowanie skokowych zmianach wybranego parametru silnika w modelu złożonego układu elektromechanicznego dla badań identyfikacji szerokości strefy luzu.

Dla celu dokonania analizy wrażliwości przyjęto, że przykładem skokowej zmiany parametru silnika może być skokowa zmiana rezystancji stojana o ograniczonym zakresie w czasie pracy napędu. Przyjęto też, że skokowa zmiana parametru podsystemu mechanicznego w okresie pracy napędu oraz skokowa zmiana momentu bezwładności mas zredukowanych i sztywno związanych z wirnikiem silnika może być ograniczona.

2. Określenie celu i tezy pracy.

Głównym celem pracy jest opracowanie i przetestowanie własnych struktur falkowo-neuronowych umożliwiających wypracowanie algorytmów diagnostycznych złożonego nieliniowego układu elektromechanicznego. Zamierzeniem autora było kompleksowe ujęcie tematu modelowania uszkodzeń złożonego układu elektromechanicznego w ich początkowej fazie powstawania, wraz z zaproponowaniem systemu wspomaganie decyzji diagnostycznej.

W tym celu w pracy wykorzystuje się jednocześnie:

- metody czasowo-częstotliwościowe oparte na dekompozycji falkowej,
- metody inteligencji obliczeniowej.

Użyte metody inteligencji obliczeniowej obejmują zastosowanie struktur sztucznych sieci neuronowych oraz metod eksploracji danych do analizy obrazu skalogramów falkowych. Model zawierający dane do obliczeń łączy wymienione wyżej elementy w jedną całość.

W realizacji pracy wyznaczono kolejno następujące cele:

- rozpoznanie stosowanych dotychczas rozwiązań dotyczących tematu pracy doktorskiej, ze zwróceniem szczególnej uwagi na: modele uszkodzeń i metody pomiaru wszystkich badanych wielkości fizycznych dla złożonego układu elektromechanicznego, konstrukcje połączeń napędu zawierającego silnik indukcyjny z obciążającym go układem mechanicznym oraz wybrane elementy sztucznej inteligencji,
- opracowanie ogólnej koncepcji połączenia wybranych metod analizy czasowo-częstotliwościowej z wybranymi metodami sztucznej inteligencji dla próby udoskonalenia dotychczas proponowanych rozwiązań,

- przy użyciu metod opartych na dekompozycji falkowej opracowanie możliwości analiz reprezentacji szczegółowej przebiegów powstałych w wyniku przeprowadzonych testów symulacyjnych dla wszystkich badanych wielkości fizycznych.
- wyznaczenie funkcji aproksymującej i wyprowadzenie struktury systemu sieci neuronowej zastosowanej w algorytmie diagnostycznym,
- przeprowadzenie badań identyfikacyjnych, zebranie bazy danych (jak największej ilości wyników badań symulacyjnych odzwierciedlających w miarę precyzyjnie rodzaj i wielkość uszkodzenia),
- przeprowadzenie analiz cech dla wyników przeprowadzonych badań,
- określenie przydatności metod zastosowanych w badaniach identyfikacyjnych.

Główna teza rozprawy jest następująca:

Istnieje możliwość diagnostyki uszkodzeń złożonego, nieliniowego układu elektromechanicznego, za pomocą uzyskanych wyników badań identyfikacyjnych przeprowadzonych w oparciu o algorytmy falkowo – neuronowe oraz metody eksploracji danych stosowane do analizy obrazów skalogramów falkowych.

3. Charakterystyka poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, których treść wynika z zakresu rozprawy i analizowanych problemów.

W niniejszej rozprawie doktorskiej w **pierwszym rozdziale** zamieszczono przegląd aktualnego stanu wiedzy, określenie celu i tezy pracy, na podstawie których przeprowadzono dalsze analizy oraz badania w zakresie identyfikacji uszkodzeń złożonego układu elektromechanicznego.

W **rozdziale drugim** przedstawiono metodologię konstruowania modelu układu elektromechanicznego ze zmieniającymi się wartościami parametrów określających występujące w nim nieliniowości. Zaprezentowano parametry modelu badanego napędu z silnikiem indukcyjnym, przyjęte modele tłumienia nieliniowego, sposób doboru rzędu i poziomu dekompozycji falkowej oraz zestawienie wymaganych parametrów dla przetestowania wybranej metody diagnostycznej.

Przedstawienie opracowanych algorytmów identyfikacji uszkodzeń złożonego układu elektromechanicznego zostało zawarte w następnych rozdziałach rozprawy.

W **rozdziale trzecim** zamieszczono analizę wrażliwości układu elektromechanicznego na skokowe zmiany rezystancji stojana silnika indukcyjnego. Przedstawiono wyniki badań uzyskane dla algorytmu wykorzystującego metody falkowo-neuronowe w identyfikacji zakresu tych zmian.

Rozdział czwarty poświęcono przedstawieniu algorytmu identyfikacji szerokości strefy luzu w połączeniach mechanicznych badanego układu napędu prądu przemiennego. W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań niezerowych szerokości strefy luzu przy wykorzystaniu skalogramów falkowych wybranych zmiennych stanu. Rozmiary strefy luzu identyfikowano w ich początkowych fazach powstawania wykorzystując metodę analizy obrazów do określenia własności skalogramów falkowych.

W **rozdziale piątym** przedstawiono badania identyfikacyjne szerokości strefy luzu w połączeniach mechanicznych układu w warunkach oddziaływania zakłóceń addytywnych. Badania identyfikacyjne zrealizowano przy wykorzystaniu metod sieci neuronowych. Opisano wyniki przetwarzania sieci neuronowej analizującej wartości współczynników rozwinięć falkowych badanych zmiennych stanu. Jako generatory zakłóceń wprowadzono: generator liczb losowych o rozkładzie Gaussa i w charakterze zakłóceń zdeterminowanych generator impulsów prostokątnych z przyjętymi wartościami amplitudy, okresu, przesunięcia fazowego i współczynnika wypełnienia.

W **rozdziale szóstym** zamieszczono analizę wrażliwości układu elektromechanicznego na skokowe zmiany momentu bezwładności wirujących mas związanych z wirnikiem. Analizę tą przeprowadzono przy wykorzystaniu metodologii zastosowanej uprzednio w rozdziale piątym. Badano dynamikę modeli, w których występują zarówno tarcie wiskotyczne jak i tarcie lepkie.

Rozdział siódmy opisuje przeprowadzone przez autora badania identyfikacyjne wartości momentu bezwładności wirujących mas związanych z wirnikiem. Przedstawiono wyniki badań uzyskane za pomocą zastosowania:

- algorytmu uczenia sieci neuronowych jednokierunkowych działającego w oparciu o analizę falkową i zapewniającego otrzymanie szybkiej zbieżności przy zmianach szerokości strefy luzu,
 - metody wykorzystującej techniki klasteryzacyjne dla obliczonych skalogramów falkowych.
- Uwzględnienie zmian szerokości strefy luzu w sposób istotny utrudniło realizację tego procesu.

Końcowy rozdział rozprawy stanowi podsumowanie, w którym przedstawiono najistotniejsze wnioski wynikające z badań przeprowadzonych przez autora oraz opisano

plany związane z rozwojem metod identyfikacji uszkodzeń złożonych układów elektromechanicznych.

Uzyskane wyniki analiz wskazują, że możliwe jest wykrywanie ograniczonych zmian parametrów nieliniowego elementu tłumiącego, w tym parametru opisującego stopień nieciągłości charakterystyki tłumienia w zerze. Na podstawie analiz stanów dynamicznych w domenie czasowo-częstotliwościowej możliwe jest też określanie bieżącej wartości szerokości strefy luzu. W pracy wykazano, że efekty te mogą być uzyskane także przy wykorzystaniu modelu zawierającego szumy o rozkładzie normalnym.

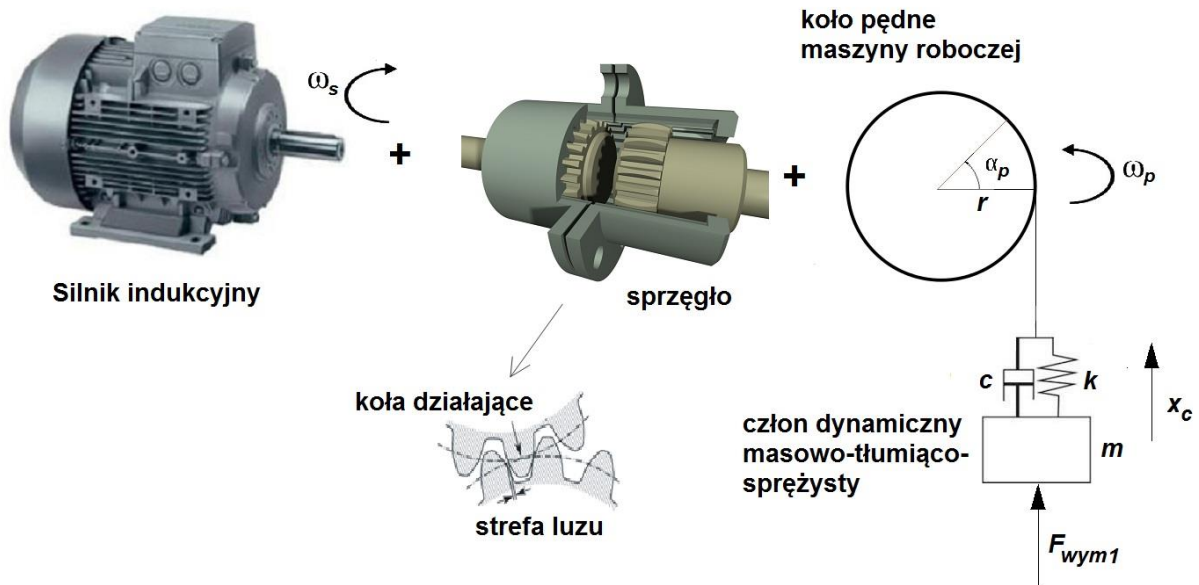
4. Metodologia modelowania układu elektromechanicznego ze zmieniającymi się wartościami parametrów opisujących nieliniowości.

4.1. Przedstawienie zastosowanego modelu napędu z silnikiem indukcyjnym.

Badania zostały przeprowadzone dla warunków znamionowych silnika indukcyjnego, którego model zbudowano w nieruchomym układzie współrzędnych związanych ze stojanem (model $\alpha, \beta, 0$).

Model silnika indukcyjnego został zrealizowany w środowisku MATLAB/Simulink. Następujące parametry silnika indukcyjnego zostały przyjęte w przeprowadzonych badaniach (parametry jego schematu zastępczego są wyrażone w jednostkach względnych):

$$J_s = 1.16 [\text{kg}\cdot\text{m}^2], r_s = 0.059 [\Omega], r_w = 0.048 [\Omega], x_m = 1.82, x_r = 1.92, x_s = 1.92, T_m = 0.86 [\text{s}], \\ w = x_s \cdot x_w - x_m \cdot x_m = 0.374.$$



Rys. 1. Schemat połączenia napędu z silnikiem indukcyjnym z członem dynamicznym masowo-tłumiąco-sprężystym za pomocą sprzęgła, w którym pojawia się i stopniowo powiększa strefa luzu.

4.2. Przedstawienie zastosowanych modeli tłumienia nieliniowego.

Analizy przeprowadzone dla układu elektromechanicznego zawierającego tłumienie nieliniowe z tarciem wiskotycznym dotyczą procesu dyssypacji energii opisanego zależnością:

$$T_{\text{tłumienie}} = \text{sign}(v_c) \cdot (c \cdot |v_c| + c_1) \quad (1)$$

gdzie:

- c - współczynnik tarcia wiskotycznego [N·s/m],
- c_1 - współczynnik nieciągłości w zerze,
- $\text{sign}(v_c)$ - znak chwilowej względnej prędkości liniowej elementów tłumika członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m/s],
- v_c - wartość bezwzględna chwilowej względnej prędkości liniowej elementów tłumika członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m/s].

Tłumienie nieliniowe $T_{\text{tłumienie}}$ jest jednym ze składników siły F_{wym1} wymuszającej ruch masy m w członie dynamicznym masowo-tłumiąco-sprężystym i opisaną zależnością:

$$F_{\text{wym1}} = m \cdot a_c + T_{\text{tłumienie}} + k \cdot x_c \quad (2)$$

gdzie:

- a_c - przyspieszenie liniowe członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m/s²],
- k - współczynnik sprężystości [N/m],
- m - masa członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [kg],
- x_c - droga członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m].

Analizy przeprowadzone dla układu elektromechanicznego zawierającego tłumienie nieliniowe z tarciem lepkiem dotyczą działania naprężenia ścinającego σ w cieczy nie-newtonowskiej.

Wartość naprężenia ścinającego σ jest wyznaczona za pomocą równania potęgowego Ostwalda de Waele'a według zależności:

$$\sigma = \eta_k \cdot \left(\frac{dv}{dx} \right)^{n_1} \quad (3)$$

gdzie:

- σ - naprężenie ścinające [Pa],
- η_k - współczynnik konsystencji lepkości pozornej [Pa·s ^{n_1}],
- n_1 - wskaźnik płynięcia,
- $\frac{dv}{dx}$ - prędkość ścinania wyrażona w jednostce [1/s].

W wyniku obliczenia naprężenia ścinającego σ jest możliwe obliczenie siły F_{wym2} wymuszającej ruch masy m w członie dynamicznym masowo-tłumiąco-sprężystym i opisanej zależnością:

$$F_{wym2} = S_1 \sigma \quad (4)$$

gdzie:

- S_1 - pole powierzchni cylindra tłumika [m²].

4.3. Uwzględnienie obecności luzu w połączeniach mechanicznych.

Luz w połączeniu mechanicznym silnika i maszyny roboczej zdefiniowano jako różnicę kątów mas wirujących sztywno związanych z wirnikiem silnika α_s i obracającego się koła pędnego maszyny roboczej α_p . Różnicę kątów wyrażono mierze łukowej.

Założono, że połączenie mechaniczne silnika z kołem pędnym maszyny roboczej realizowane jest za pomocą sprzęgła. Analiza dynamiki badanego układu elektromechanicznego w strefie luzu jest możliwa w chwili, kiedy zostaje spełniona nierówność (5) określająca wzajemną zależność wyrażonych w mierze łukowej kątów:

$$\left| \alpha_s - \alpha_p \right| < \frac{K_{3(i)}}{r} \quad (5)$$

gdzie:

- r - promień koła pędnego maszyny roboczej [m],
- $K_{3(i)}$ - jest to i -ta kolejno pobierana wartość macierzy K_3 odpowiadająca zadanej dla kolejnego testu szerokości strefy luzu w połączeniu mechanicznym,
- i - numer kolumny macierzy K_3 .

Wartości kątów α_s i α_p obliczane są według poniższych zależności:

$$\alpha_s = \int \omega_s \cdot dt \quad (6)$$

$$\alpha_p = \int \omega_p \cdot dt \quad (7)$$

gdzie:

- ω_p – prędkość kątowa koła pędnego maszyny roboczej [rad/s],
- ω_s – prędkość kątowa wirnika silnika [rad/s].

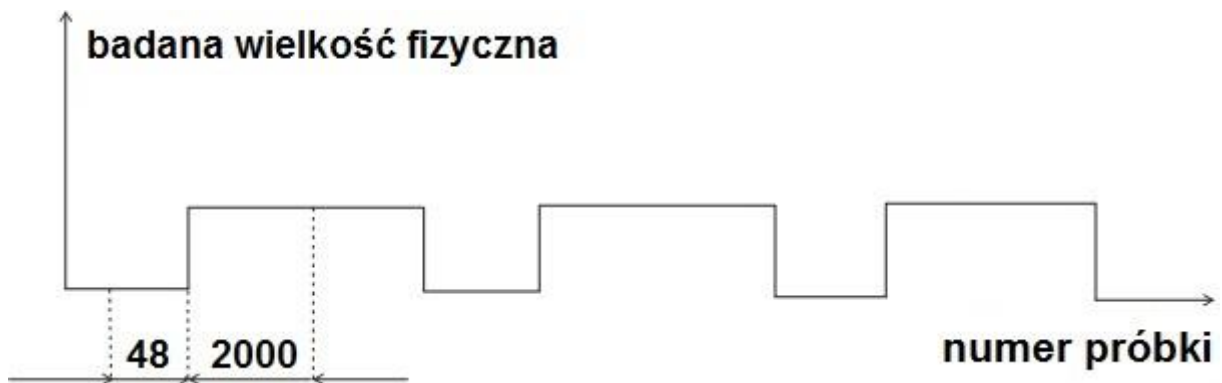
W wyniku spełnienia nierówności (5) zostaje zerwane połączenie silnika z obciążającym go układem mechanicznym. Wtedy moment elektromagnetyczny silnika przestaje oddziaływać na obciążający go układ mechaniczny. Sytuacja taka ma miejsce do czasu wybrania luzu. Napęd pracuje jako układ pozbawiony luzu, gdy kąt ten jest równy zeru.

W przypadku napędów nawrotnych, kiedy zadany kierunek ruchu masy podlega częstym zmianom, sztywne połączenie mechaniczne ulega w okresie eksploatacji stopniowemu odkształceniu i pomiędzy masami wirującymi silnika i maszyny roboczej pojawia się niewielka strefa martwa (luz), która sprawia, że układ elektromechaniczny pracuje niejako

w dwóch stanach.

Pierwszy stan to tzw. wybieranie luzu. Szttywne połączenie mechaniczne jest wówczas zerwane, a moment elektromagnetyczny silnika jest równy zero. Wówczas silnik pracuje na biegu jałowym, pokonując tylko własne oporu ruchu. Po wykonaniu obrotu wału silnika o pewien kąt α_s zaobserwujemy przebiegający gwałtownie stan dynamiczny opisujący sztywne lub sprężyste sprzęgnięcie się silnika z maszyną roboczą. Wraz z zakończeniem się tego stanu dynamicznego kończy się proces wybierania luzu. Pracę układu elektromechanicznego po zakończeniu tego procesu opisują zwykłe równania dynamiki, jak w przypadku sztywnego połączenia pomiędzy silnikiem i maszyną roboczą.

Przy realizacji badań założono a priori, że określona wyżej macierz K_3 będzie zawierać 2000 próbek sygnału, kolejno wybranych od momentu osiągnięcia w badanym modelu układu elektromechanicznego strefy luzu oraz 48 próbek poprzedzających ten moment. W ten sposób łączna liczba próbek osiągnie wartość $2^{11} = 2048$, co pozwoli efektywnie wykorzystać algorytm analizy wielorozdzielczej. Założenie to zobrazowano na rys. 2. Opisana zasada wyboru zakresu analizowanych próbek sygnałów została zastosowana dla każdego przeprowadzanego w pracy testu symulacyjnego dla wszystkich badanych wielkości fizycznych.



Rys. 2. Badanie dynamiki w strefie luzu dla wszystkich analizowanych wielkości fizycznych przeprowadzono poprzez następujący wybór przedziału czasu (próbek badanego sygnału).

Przy realizacji pracy przeprowadzono również testy symulacyjne dla napędu z silnikiem indukcyjnym ze sztywnym połączeniem między wirnikiem silnika a kołem pędym maszyny roboczej uwzględniając poślizg końcówki liny na powierzchni koła pędym maszyny roboczej. Poślizg ten, spowodowany bezwładnością obciążenia mechanicznego, powoduje podobnie jak luz w sprzęgle, czasowe zerwanie połączenia silnika z obciążającym go układem mechanicznym.

Rozpoczęcie badań dynamiki układu elektromechanicznego w strefie utraty połączenia następowało w momencie kiedy została spełniona nierówność (8) opisująca zależność pomiędzy kątami wyrażonymi w mierze łukowej:

$$\left| \alpha_s - \alpha_c \right| < \frac{K_{3(i)}}{r} \quad (8)$$

gdzie:

α_c - kąt zmiany położenia masy członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [rad/s].

Wartości kątów obliczane są według poniższych zależności:

$$\alpha_s = \frac{x_r}{r} \quad (9)$$

$$\alpha_c = \frac{x_c}{r} \quad (10)$$

gdzie:

- r - promień koła pędnego maszyny roboczej [m],
- x_c – droga liniowa przebyta przez masę członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego [m],
- x_r – droga liniowa przebyta przez masy wirujące związane z wirnikiem silnika [m].

Po spełnieniu nierówności (8) następowało przerwanie połączenia pomiędzy silnikiem i obciążającym go układem mechanicznym. Moment obciążenia maszyny indukcyjnej, który jest wynikiem oddziaływania zwrotnego członu dynamicznego masowo-tłumiąco-sprężystego, był w modelu obliczeniowym zerowany do czasu odzyskania połączenia po poślizgu.

4.4. Przedstawienie skokowych zmian identyfikowanych uszkodzeń i stref luzu zastosowanych w badaniach.

W przeprowadzanych eksperymentach w rozdziale trzecim przyjęto różne skokowe zmiany zwiększenia wartości rezystancji stojana r_s względem jej wartości nominalnej. Zmiany te określone w wartościach całkowitoliczbowych, wyrażone w procentach, pokazano w Tabeli 1.

T a b e l a 1 Przedstawienie skoku rezystancji stojana r_s

Numer wiersza macierzy odpowiednio przyjętej w badaniu	Wartości skoku rezystancji stojana [%]
1	1
2	2
3	5
4	10
5	15
6	20

Odpowiadające tym skokowym zmianom rezystancji uzwojenia wyniki zarchiwizowano w macierzy o wymiarach 7x2048.

Wyniki kolejnych testów symulacyjnych przeprowadzonych przy powiększających się wartościach szerokości strefy luzu zapisywano w odpowiedniej macierzy o wymiarze 6x2048. W każdym z kolejnych testów zakładano a priori wartość szerokości strefy luzu pobierając ją z macierzy K_3 według porządku pokazanego w Tabeli 2.

T a b e l a 2 Przedstawienie zmian szerokości strefy luzu

Numer wiersza macierzy odpowiednio przyjętej w badaniu	Szerokość strefy luzu
1	0,0025
2	0,00375
3	0,005
4	0,0075
5	0,009
6	0,01

Formalny zapis zmian momentu bezwładności J_s w macierzy K_4 dla dwóch założonych przypadków połączenia napędu zawierającego silnik indukcyjny z maszyną roboczą pokazano w Tabeli 3 i 4. W procedurze obliczeniowej formalnie przyjęto, że zmniejszenie wartości momentu bezwładności następuje o wartość A%, a zwiększenia go o wartość C% względem jego wartości nominalnej.

W przypadku analiz układu napędowego zawierającego luz w sprzęgle wartość momentu bezwładności J_p nie była zmieniana podczas każdej przeprowadzonej symulacji dla wszystkich analizowanych wielkości fizycznych.

Tabela 3 Przedstawienie zmian momentu bezwładności J_s w macierzy K_4 które zostały przyjęte dla sztywnego połączenia badanego napędu z kołem pędym maszyny roboczej

Numer kolumny macierzy K_4	Wartości zmian [%]
1	Wartość nominalna
2	A=2,5
3	A=5
4	A=7,5
5	A=17,5
6	C=2,5
7	C=5

Tabela 4 Przedstawienie zmian momentu bezwładności J_s w macierzy K_4 które zostały przyjęte dla połączenia badanego napędu z kołem pędym maszyny roboczej za pomocą sprzęgła

Numer kolumny macierzy K_4	Wartości zmian [%]
1	Wartość nominalna
2	A=2,5
3	A=5
4	A=7,5
5	A=12,5
6	C=2,5
7	C=5

We wszystkich badaniach przeprowadzonych dla połączenia napędu z silnikiem indukcyjnym za pomocą sprzęgła ze zmieniającą się szerokością strefy luzu przyjęto:

- wartość momentu bezwładności mas zredukowanych na wale silnika J_s równą 0,87 [kg·m²] i odpowiadającą 75 [%] wartości nominalnej momentu bezwładności J_s , która została przyjęta w przypadku sztywnego połączenia napędu zawierającego silnik indukcyjny z kołem pędym maszyny roboczej,
- wartość momentu bezwładności mas zredukowanych na kole pędym maszyny roboczej J_p równą 0,348 [kg·m²] i odpowiadającą 30 % zmianie wartości nominalnej momentu bezwładności. Wartość ta została określona na podstawie najkorzystniejszego wyniku testów symulacyjnych przeprowadzonych dla trzech następujących zmian procentowych wartości nominalnej momentu bezwładności: 25%, 30% i 35%.

Ponadto w przypadku wszystkich badań przeprowadzonych dla omawianego połączenia zrealizowanego przy pomocy sprzęgła wartości momentów bezwładności J_p i J_s po spełnieniu nierówności (5) zmieniano na wartość odpowiadającą ich sumie. Wartość ta była utrzymywana aż do chwili wybrania luzu, a następnie z powrotem zmieniona na wartość odpowiedniego momentu bezwładności J_p i J_s przyjętą w badaniu.

Wartości momentów bezwładności J_p i J_s w strefie luzu ustalono jako:

$$J_p = J_p + J_s \quad (11)$$

$$J_s = J_p + J_s \quad (12)$$

5. Przedstawienie wyników przeprowadzonych badań identyfikacji uszkodzeń oraz wypływających z nich wniosków.

Zaprezentowane w pracy automatyczne systemy diagnostyki mogą wspierać operatora w procesie nadzoru i w istotnym stopniu pomagać w podejmowaniu decyzji już podczas występowania pierwszych symptomów uszkodzeń. Przejawia się to poprzez znaczne skrócenie czasu wykrycia i lokalizacji uszkodzenia w stosunku do możliwości systemów wykorzystujących klasyczne metody fourierowskie.

Dzięki skróceniu czasu wykrycia wstępnej fazy powstawania uszkodzenia możliwe jest wykonywanie w sposób automatyczny działań, które pozwolą uniknąć szkodliwych skutków jego wystąpienia lub przynajmniej ograniczyć ich zasięg w okresie kontynuowania przebiegu procesu technologicznego.

Na podstawie uzyskanych wyników identyfikacji uszkodzenia, opisanych w rozdziale trzecim, można wywnioskować, że zasadniczą rolę w zapewnieniu poprawności działania opracowanego algorytmu diagnostycznego odgrywa uzyskanie, odpowiadających złożonym stanom dynamicznym, selektywnych wartości wskaźników Mse_1 , Mse_2 i Mae_1 . Selektywne wartości tych wskaźników można uzyskać poprzez określenie odpowiednich zakresów parametrów uczenia sieci neuronowych takich jak: wartości ustalonej dla zatrzymania procesu uczenia i wartości współczynnika uczenia dla pierwszej sieci neuronowej oraz zwiększanie liczby epok przetwarzania i wartości współczynnika uczenia drugiej sieci neuronowej.

W rozdziale czwartym wykazano, że skuteczność działania zastosowanej metody identyfikacji uszkodzenia w jego początkowej fazie powstawania uzależniona jest od wyniku ustalenia wartości macierzy wzorcowych obliczonych za pomocą liniowej dyskryminanty Fishera.

Zauważono, że uzyskanie zawsze prawidłowego wyniku identyfikacji uszkodzenia jest możliwe dzięki zastosowaniu:

- selekcji intensywności barwy pikseli skalogramów falkowych otrzymanych dla układu pozbawionego luzu,
- zwiększania wartości stosowanych w obliczeniach liniowej dyskryminanty Fishera.

Przedstawiona w rozdziale piątym metoda wykrywania uszkodzeń zapewnia osiągnięcie zadowalających wyników identyfikacji przy prawidłowo dobranej ilości epok przetwarzania sieci neuronowej i współczynników uczenia w każdej z warstw sieci neuronowej. Prawidłowy dobór i polepszenie jakości wyników identyfikacji uzyskano testując w pewnych zakresach te parametry przetwarzania sieci. Stwierdzono, że wybór rodzaju falki i jej rzędu,

uwzględniający charakter analizowanych sygnałów wielkości fizycznych, w istotny sposób wpływa na zapewnienie właściwego przebiegu procesu przetwarzania sieci neuronowej.

W prezentowanej poniżej tabeli o numerze 5 w kolumnie o nazwie *Parametry badania* podano przyjęte wartości parametrów charakterystyki tłumienia oraz parametry przetwarzania sieci neuronowej (liczbę epok, współczynniki uczenia obu warstw sieci).

Natomiast w kolumnie o nazwie *Wyniki* przedstawiono za pomocą czcionki pogrubionej otrzymane wyniki minimalizacji elementów macierzy uzyskane dla przypadku połączenia napędu zawierającego silnik indukcyjny z kołem pędym maszyny roboczej za pomocą sprzęgła.

Wyniki badań zamieszczone w przedstawionej poniżej tabeli potwierdzają słuszność zaprezentowanych wniosków. W analizach sygnału przyspieszenia liniowego silnika a_s , jakość wyników minimalizacji macierzy ulega niewielkiemu pogorszeniu dla współczynnika uczenia warstwy Kohonena l_1 zwiększającego się w zakresie od 0,1 do 0,9 i przy niezminiającej się wartości współczynnika uczenia warstwy Grossberga l_2 równej 0,09. Ponadto przyjęcie liczby epok przetwarzania sieci neuronowej w przedziale pomiędzy 20 a 40 prowadzi do istotnego wzrostu jakości identyfikacji uszkodzenia.

T a b e l a 5 Przykładowe wyniki badań macierzy uzyskane dla przyspieszenia liniowego silnika a_s w układzie elektromechanicznym zawierającym tarcie lepkie.

Parametry badania	Wyniki	Parametry badania	Wyniki
luz = 0.009/ r ,	1.5895	luz = 0.009/ r ,	0.0859
współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$,	0.9248	współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$,	0.0500
wskaźnik płynięcia $n_l = 0.91$,	0.2620	wskaźnik płynięcia $n_l = 0.91$,	0.0142
epoki = 30,	0.4710	epoki = 30,	0.0255
współczynnik uczenia warstwy Kohonena sieci neuronowej $l_1 = 0.1$,	0.0025	współczynnik uczenia warstwy Kohonena sieci neuronowej $l_1 = 0.1$,	0.0001
współczynnik uczenia warstwy Grossberga sieci neuronowej $l_2 = 0.09$	0.8902	współczynnik uczenia warstwy Grossberga sieci neuronowej $l_2 = 0.01$	0.0481
luz = 0.005/ r ,	0.5442	luz = 0.005/ r ,	3.1848
współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0375$,	0.2718	współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0375$,	1.5904
wskaźnik płynięcia $n_l = 0.97$,	0.0003	wskaźnik płynięcia $n_l = 0.97$,	0.0019
epoki = 20,	0.2998	epoki = 40,	1.7545
współczynnik uczenia warstwy Kohonena sieci neuronowej $l_1 = 0.1$,	0.1076	współczynnik uczenia warstwy Kohonena sieci neuronowej $l_1 = 0.1$,	0.6297
współczynnik uczenia warstwy Grossberga sieci neuronowej $l_2 = 0.09$	0.2585	współczynnik uczenia warstwy Grossberga sieci neuronowej $l_2 = 0.09$	1.5130

Porównując przedstawione za pomocą czcionki pogrubionej wyniki minimalizacji elementów macierzy z pozostałymi jej elementami można stwierdzić, że różnica uzyskanych wskaźników jest wyraźna, tym samym selektywność procedury wyboru wartości minimalnej może być uznana za wysoką.

W rozdziale szóstym opisano badania, które potwierdziły, że zwiększanie wartości współczynnika uczenia sieci neuronowej w określonym zakresie znacząco poprawiło skuteczność identyfikacji uszkodzenia. Przetwarzanie sieci neuronowej zostało wykonane przy wykorzystaniu obliczonych w etapie poprzedzającym współczynników rozwinięć falkowych badanych sygnałów diagnostycznych. Zwiększanie wartości ustalonej dla zatrzymania procesu uczenia sieci neuronowej w odpowiednim zakresie prowadziło do zmian ilości epok przetwarzania, które ułatwiły przeprowadzenie szybkiego i efektywnego procesu identyfikacji szerokości strefy luzu.

W zamieszczonej poniżej tabeli o numerze 6 w kolumnie o nazwie *Parametry badania* przedstawiono wartości parametrów mechanicznych (tłumienie, współczynnik konsystencji, moment bezwładności, luz) oraz parametry sieci neuronowej (epoki, współczynnik uczenia sieci, wartość ustalona dla zatrzymania procesu uczenia sieci).

W kolumnie o nazwie *Wyniki* przedstawiono przyjęte w procesie identyfikacji szerokości strefy luzu, z których za pomocą czcionki pogrubionej wyróżniono otrzymane końcowe wartości macierzy uzyskane dla przypadku połączenia napędu zawierającego silnik indukcyjny z kołem pędnym maszyny roboczej za pomocą sprzęgła z istniejącym luzem.

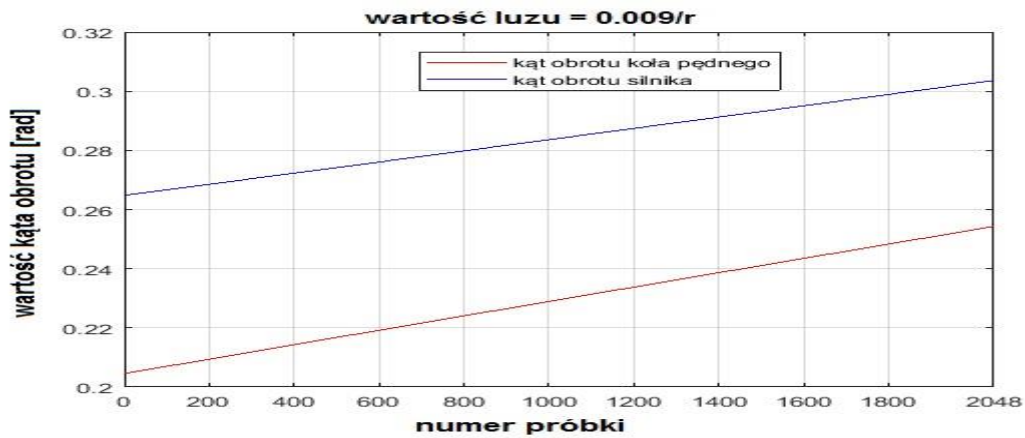
Tabela 6 Przykładowe wyniki badań uzyskane dla prędkości kątowej wirnika silnika ω dla tarcia wiskotycznego

Parametry badania	Wyniki $\cdot 10^{-3}$	Parametry badania	Wyniki $\cdot 10^{-3}$
luz = 0.005/ r , tłumienie $c = 0.8$, moment bezwładności $J_s = 0.8047$ (zmiana J_s w dół o 7,5%), epoki = 22, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_b = 0.9$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_1 = 0.08$	0.3001 0.1935 0.0185 0.2341 0.4384 1.2073	luz = 0.005/ r , tłumienie $c = 0.8$, moment bezwładności $J_s = 0.8047$ (zmiana J_s w dół o 7,5%), epoki = 25, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_b = 0.8$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_1 = 0.08$	0.3008 0.1939 0.0185 0.2346 0.4393 1.2098
luz = 0.01/ r , tłumienie $c = 1.25$, moment bezwładności $J_s = 0.87$ (wartość nominalna), epoki = 22, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_b = 0.9$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_1 = 0.08$	0.2754 0.3908 0.1967 0.0907 0.1643 0.0244	luz = 0.01/ r , tłumienie $c = 1.25$, moment bezwładności $J_s = 0.87$ (wartość nominalna), epoki = 39, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_b = 0.6$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_1 = 0.07$	0.2937 0.4168 0.2099 0.0966 0.1751 0.0260

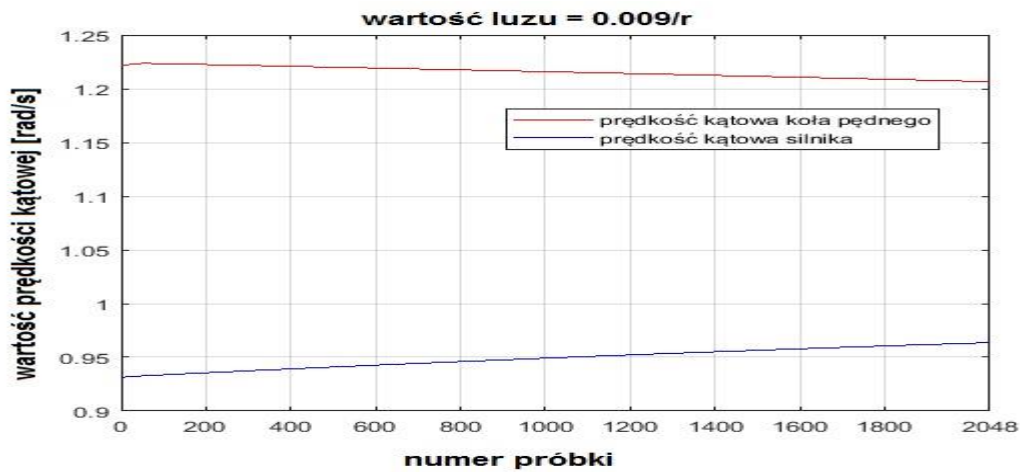
Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli o numerze 6 można stwierdzić, że uzyskanie niezadawalającego wyniku identyfikacji uszkodzenia określanego na podstawie obliczonej wartości minimalnej macierzy nie występuje dla współczynnika uczenia sieci neuronowej l_b przyjmującego wartości w zakresie od 0,6 do 0,9 oraz dla wartości stosowanej dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej δ_1 zmieniającej się w przedziale od 0,07 do 0,08.

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi wybranych wartości zmiennych zarejestrowane w momencie kiedy badany układ elektromechaniczny znajduje się w strefie luzu o szerokości równej 0,009/ r dla testu przeprowadzonego ze współczynnikiem tarcia wiskotycznego $c = 0,8$ i nieciągłością w zerze = 0,2. Wyniki badania uzyskano w przypadku zastosowania połączenia badanego napędu z maszyną roboczą za pomocą sprzęgła oraz przyjęcia wartości momentów bezwładności $J_s = 0,8047$ (zmiana J_s w dół o 7,5%) i $J_p = 0,348$.

a)



b)



c)



Rys. 3. Przebiegi porównawcze wartości zmiennych koła pędnego maszyny roboczej i silnika: kątów obrotu (a), prędkości kątowych (b) i przyspieszeń kątowych (c).

W rozdziale siódmym przeprowadzono wyniki analiz przy wykorzystaniu metody falkowo-neuronowej. Na ich podstawie można wnioskować, że odpowiedni dobór

parametrów zastosowanej metody badawczej umożliwia otrzymanie prawidłowego wyniku identyfikacji szerokości strefy luzu. Warunkami tymi są: przyjęcie odpowiedniego rodzaju falki i jej rzędu oraz zwiększanie wartości współczynnika uczenia i zmniejszanie wartości ustalonej dla zatrzymania procesu uczenia sieci neuronowej.

W tym samym rozdziale pokazano, że sprowadzenie wartości intensywności barwy pikseli badanych skalogramów falkowych do określonych przedziałów wyraźnie polepsza jakość procesu identyfikacyjnego. Przy zastosowaniu wybranej techniki klasteryzacyjnej dla odpowiednio zmienionych intensywności barwy pikseli wartości macierzy wzorcowych ukształtowały się optymalnie. Odpowiednio ukształtowane wartości tych macierzy stanowiły w dużym stopniu o skuteczności uzyskania prawidłowych wyników identyfikacji.

W prezentowanych poniżej tabelach o numerach 7 i 8 w kolumnie o nazwie *Parametry badania* podano szerokości strefy luzu przyjęte w procesie identyfikacji wartości momentu bezwładności mas zredukowanych i sztywno związanych z wirnikiem silnika J_s .

W poniższych tabelach za pomocą czcionki pogrubionej przedstawiono otrzymane prawidłowe wyniki uzyskane finalnie w procesie identyfikacji numeru uszkodzenia i stanowiące końcowe rezultaty obliczeń macierzy.

Tabela 7 Przykładowe wyniki badań macierzy uzyskane dla przyspieszenia liniowego masy a_c dla tarcia lepkiego i sztywnego połączenia między wirnikiem silnika a kołem pędym maszyny roboczej

Parametry badania	Wyniki	Parametry badania	Wyniki
moment bezwładności $J_s = 0.957$ (zmiana J_s w dół o 17,5%), luz = 0.009/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0375$, epoki = 6, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_c = 0.9$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_c = 1 \cdot 10^{-5}$	1.4902 1.4776 1.4566 0.5744 0.0864 1.4958 1.5023	moment bezwładności $J_s = 0.957$ (zmiana J_s w dół o 17,5%), luz = 0.009/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0375$, epoki = 5, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_c = 0.9$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_c = 1 \cdot 10^{-4}$	4.5547 4.5166 4.4511 4.2691 0.0482 4.5754 4.5910
moment bezwładności $J_s = 1.131$ (zmiana J_s w dół o 2,5%), luz = 0.01/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$, epoki = 7, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_c = 0.9$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_c = 1 \cdot 10^{-5}$	0.0129 0.0052 0.0216 1.6877 1.4747 0.0254 0.0300	moment bezwładności $J_s = 1.131$ (zmiana J_s w dół o 2,5%), luz = 0.01/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$, epoki = 6, współczynnik uczenia sieci neuronowej $l_c = 0.1$, wartość ustalona dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej $\delta_c = 1 \cdot 10^{-4}$	0.0037 0.0001 0.0082 0.0270 0.0418 0.0064 0.0078

Na podstawie wyników zamieszczonych w powyższej tabeli o numerze 7, uzyskanych dla badania przeprowadzonego za pomocą metody falkowo-neuronowej możemy stwierdzić, że otrzymanie prawidłowych wyników identyfikacji numeru uszkodzenia dla wszystkich badanych wielkości fizycznych jest możliwe za pomocą spełnienia następującego warunku:

- przeprowadzenia symulacji ze współczynnikiem uczenia sieci neuronowej l_c zmieniającym się w zakresie od 0,1 do 0,9 przy wartości ustalonej dla zatrzymania uczenia sieci neuronowej δ_c równej $1 \cdot 10^{-4}$.

Natomiast uzyskanie prawidłowych wyników identyfikacji numeru uszkodzenia dla badania stosującego wybraną technikę klasteryzacyjną jest możliwe przy przeprowadzeniu testów diagnostycznych z parametrem optymalizacyjnym p równym i większym niż 2. Zaobserwowane wnioski potwierdzają wyniki badań zamieszczone w przedstawionej poniżej tabeli o numerze 8.

Tabela 8 Przykładowe wyniki badań macierzy uzyskane dla momentu elektromagnetycznego silnika m_{el} dla tarcia lepkiego i sztywnego połączenia między wirnikiem silnika a kołem pędym maszyny roboczej

Parametry badania	Wyniki	Parametry badania	Wyniki
moment bezwładności $J_s = 1.102$ (zmiana J_s w dół o 5%), luz = 0.0075/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$, parametr optymalizacyjny $p = 2$	0.7347 0.3730 0.0012 0.4137 2.4923 1.0490 1.3497	moment bezwładności $J_s = 1.102$ (zmiana J_s w dół o 5%), luz = 0.0075/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.0125$, parametr optymalizacyjny $p = 3$	1.0650 0.5381 0.0023 0.5904 3.4786 1.5264 1.9718
moment bezwładności $J_s = 1.189$ (zmiana J_s w górę o 2,5%), luz = 0.01/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.05$, parametr optymalizacyjny $p = 3$	0.4008 0.8187 1.3102 1.7962 4.2535 0.0050 0.3993	moment bezwładności $J_s = 1.189$ (zmiana J_s w górę o 2,5%), luz = 0.01/ r , współczynnik konsystencji $\eta_k = 0.05$, parametr optymalizacyjny $p = 9$	0.3424 0.7000 1.1203 1.5364 3.6411 0.0046 0.3415

Konkludując należy podkreślić, że metody zaprezentowane w tej pracy mogą ułatwić projektowanie testów diagnostycznych w układach rzeczywistych. Wykorzystanie tych metod umożliwi konstruowanie szerokiego wachlarza modeli opartych na metodach skupiających różne typy sieci neuronowych i wykorzystujących analizę obrazu.

W wyniku przeprowadzonych w tej pracy badań możliwe jest zaprezentowanie następujących wniosków:

- w domenie czasowo-częstotliwościowej istnieje zdolność wykrywania, jak i identyfikacji uszkodzenia w początkowej fazie jego powstawania w wyniku wyodrębnienia oraz analizy informacji z otrzymanych szeregów czasowych wybranych wielkości fizycznych układu elektromechanicznego,
- wykorzystanie informacji zawartej w skalogramach falkowych wybranych zmiennych stanu opisujących wielkości fizyczne umożliwia zapewnienie prawidłowego przebiegu wnioskowania o rodzaju i miejscu występowania niepożądanych stanów dla modelu układu elektromechanicznego zawierającego elementy silnie nieliniowe,
- wszystkie zmienne zastosowane jako sygnały wejściowe w procesie uczenia sieci neuronowych z nadzorem jak i bez nadzoru niosą informacje o symptomach pojawienia się uszkodzenia,

- założone modele neuronowe dla badanego modelu układu elektromechanicznego pozwalają skutecznie rozwiązywać problem identyfikacji uszkodzeń w systemie za pomocą wartości współczynników wagowych sieci. Właściwe wyznaczenie tych wartości uzyskuje się w procesie uczenia przyjętych architektur sieci neuronowych,
- prawidłowe działanie systemu diagnostycznego o wystarczającej selektywności identyfikacji stanów dynamicznych wymaga zastosowania macierzy wzorcowych utworzonych w wyniku analiz powtarzanych dla układu elektromechanicznego z luzem oraz z tarciem wiskotycznym, jak i tarciem lepkiem.