

Krzysztof NOWICKI, Janusz SEMPRUCH

SZTUCZNA SIEĆ NEURONOWA JAKO ŚRODOWISKO UOGÓLNIENIA PODSTAWOWEJ CHARAKTERYSTYKI ZMĘCZENIOWEJ

W pracy przedstawiona jest idea budowy uogólnionej charakterystyki zmęczeniowej bazująca na pojęciach atraktora. Zaprezentowano wyniki wstępnej weryfikacji obliczeniowej zrealizowane na bazie zależności Morrowa. Podstawowym elementem pracy jest zdefiniowanie postaci uogólnionej charakterystyki zmęczeniowej, dla której nie istnieją zależności analityczne. Przedstawiony jest sposób tworzenia zbioru treningowego niezbędego do modelowania przedstawionej charakterystyki w środowisku sztucznej sieci neuronowej.

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
Wydział Mechaniczny, Katedra Sterowania i Konstrukcji
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Dla przedstawienia koncepcji uogólnionej charakterystyki zmęczeniowej w dalszej części pracy będą wykorzystywane wybrane pojęcia wywodzące się z teorii systemów [2, 4]. W teorii tej przez układ fizyczny rozumie się wyodrębniony z otaczającego świata obiekt lub zbiór obiektów, którego własności lub zjawiska w nim zachodzące są przedmiotem badań. Każdy układ fizyczny, zależnie od jego charakteru, określają pewne wielkości fizyczne, które wyznaczają stan badanego układu fizycznego w danej chwili. Badanie zmian wartości stanu układu fizycznego, w zależności od stanu początkowego, podczas zachodzenia w nim danego zjawiska nazywa się badaniem dynamiki układu. Wartości stanu układu fizycznego możemy utożsamiać ze współrzędnymi określającymi położenie punktu w pewnej przestrzeni n -wymiarowej, natomiast ich zmianę jako przemieszczenie punktu w tejże przestrzeni. Przestrzeń ta nazywana jest przestrzenią stanów lub przestrzenią fazową. Zmiany stanu układu fizycznego nazywa się zachowaniem układu, a układy fizyczne, w których takie zmiany następują – układami dynamicznymi. Zmiany stanu danego układu fizycznego opisywane są za pomocą układów równań różniczkowych. Krzywa, po jakiej porusza się układ fizyczny w przestrzeni stanów, jest zdeterminowana przez odwzorowanie ϕ oraz warunki początkowe stanu układu i nazywana trajektorią lub orbitą. Jeśli badane jest zachowanie długookresowe układu dynamicznego to okazuje się, że trajektorie, niezależnie od warunków początkowych, zbiegają do pewnych charakterystycznych obszarów przestrzeni fazowej – atraktorów, natomiast przez pewne obszary – repelery – są odpychane. Otoczenie atraktora, w którym nie działa żaden inny atraktor, nazywane jest zbiorem przyciągania – polem receptorowym.

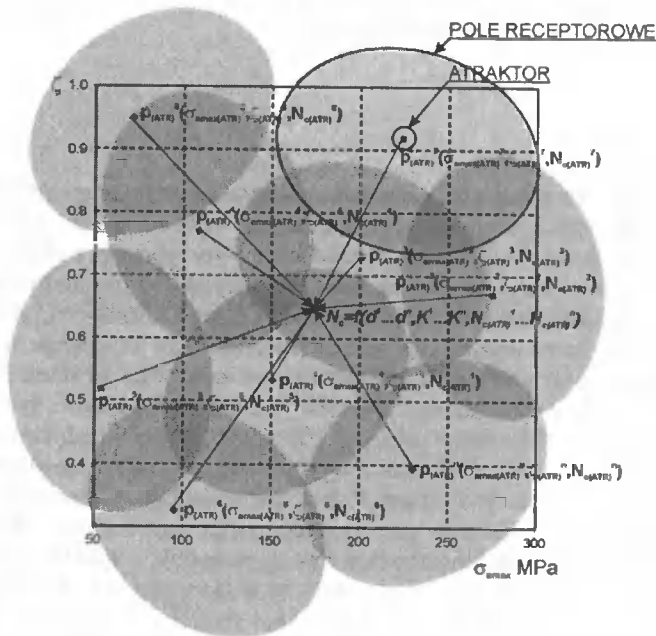
Badania dynamiki układów o wielu stopniach swobody ujawniły, że liczba stopni swobody może zostać zredukowana. Ruch układu, który odbywa się w przestrzeni o wielkim wymiarze, staje się wtedy zawężony do podprzestrzeni o małym wymiarze, którą nazywamy atraktorem. Identyfikacja współrzędnych charakteryzujących atraktor

oraz postaci odwzorowania trajektorii upraszcza zadanie predykcji złożonego układu fizycznego. W przypadku zjawisk zmęczeniowych postać odwzorowania oraz współrzędne atraktora, które realizują pożądaną ekstrapolację, nie są znane. Z tego powodu interesujące są możliwości sieci neuronowych, które umożliwiają pozyskanie brakujących informacji w procesie treningu.

2. PRZYKŁADOWY ATRAKTOR W PROBLEMATYCE ZMĘCZENIOWEJ

Opracowany sposób tworzenia uogólnionej charakterystyki zmęczeniowej cechuje się koniecznością stosowania nietypowych algorytmów przetwarzania danych. Brak możliwości ustalenia na drodze rozważań teoretycznych położenia atraktorów, kształtu, zasięgu oraz orientacji pól receptorowych wymusza stosowanie algorytmów uczących się, w których ustalenie niektórych parametrów modelu następuje poprzez zastosowanie treningu opartego o zbiór przykładów, bazujących na danych eksperymentalnych.

Przykładem, którym się posłużono dla zobrazowania funkcjonowania atraktorów w nauce o zmęczeniu, będzie problem powiązania krzywej Wöhlera z krzywą trwałości zmęczeniowej.



Rys. 1. Atraktory i pola receptorowe o współrzędnych σ_{max} , ζ oraz schemat metody prognozowania trwałości zmęczeniowej N_c

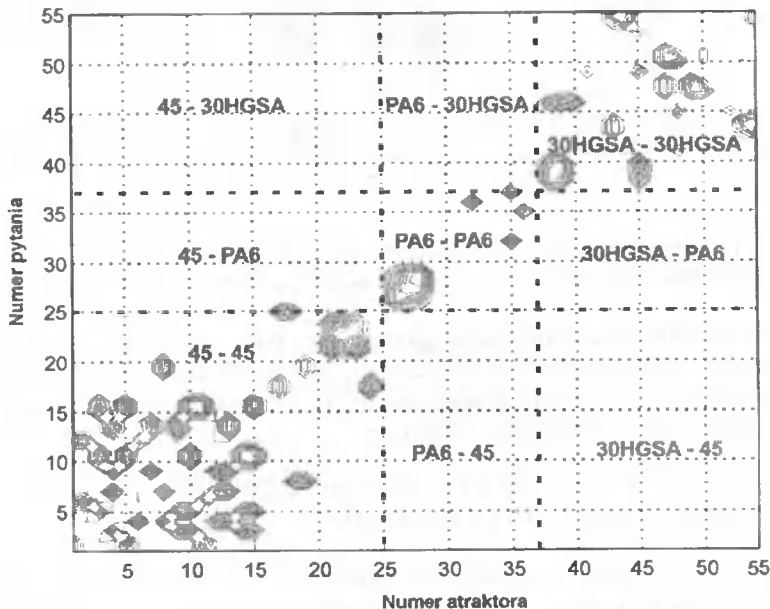
Dysponując współzrędnymi atraktorów $p_{(ATR)}$ (rys. 1) oraz ich polami receptorowymi można opisać w sposób ciągły wybrany obszar przestrzeni fazowej w układzie współrzędnych o osiach określonych przez cechy zjawisk zmęczeniowych (na rysunku 1 przykładowo: σ_{max} – maksymalna amplituda naprężenia cyklu, ζ – współczynnik wypełnienia widma, N_c – trwałość zmęczeniowa – oś niewidoczna, prostopadła do płaszczyzny rysunku). Wyznaczenie charakterystyki opartej o współzrędnymi atraktorów

$P_{(ATR)}(\sigma_{amax(ATR)}, \zeta_{(ATR)}, N_{c(ATR)})$ następuje przez wyznaczenie wektorów d łączących podane współrzędne wskazanego zjawiska zmęczeniowego (σ_{σ}, ζ) z tymi samymi współrzędnymi wszystkich atraktorów. Prognozie podlegają pozostałe współrzędne przestrzeni fazowej (na rysunku N_c) w oparciu o wartości funkcji podobieństwa K , działającej w polach receptorowych wszystkich atraktorów [7, 10].

3. WERYFIKACJA IDEI W ODNIESIENIU DO ZNANEGO ZAPISU ANALITYCZNEGO

Prezentowana idea znalazła swoją wstępną weryfikację, której dokładny opis można znaleźć w pracach [8, 9]. Zbudowano sztuczną sieć neuronową, w której zaimplementowano znany model niskocyklowej trwałości zmęczeniowej bazujący na zależności Morrowa. Dla treningu tej sieci wykorzystano dane eksperymentalne uzyskane w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Dane pochodziły w całości z programu badawczego, którego wyniki opublikowano w pracy [14]. W pozyskanym zbiorze 29 prób zmęczeniowych dotyczyło stali 45, 18 – stali stopowej 30HGSA, a 8 – stopu aluminium PA6. Wszystkie próby zostały wykonane dla różnych poziomów stałej amplitudy odkształceń cyklu wahadłowego w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem znormalizowanych próbek bez karbu [11].

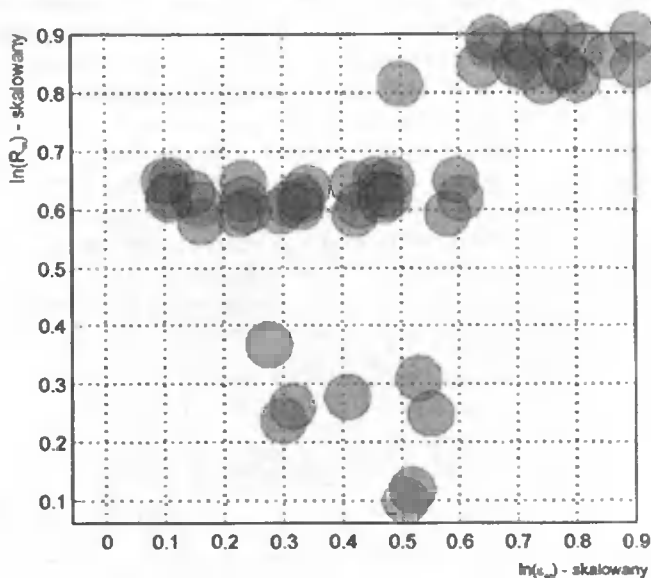
Prezentowany na rysunku 2 wykres konturowy wartości miar podobieństwa został uzyskany na drodze analizy wartości funkcji aktywacji ukrytej warstwy sztucznej sieci neuronowej. Posłużył on do weryfikacji jakości działania stosowanego algorytmu oraz założeń teoretycznych dotyczących możliwości zastosowania atraktorów do opisywania zjawisk zmęczeniowych. Postać wykresu potwierdziła poprawność tych założeń.



Rys. 2. Wykres wartości miar podobieństwa

Wprowadzone do sieci dane na temat stali 45 wykazywały miarę podobieństwa K różną od 0 tylko wtedy, gdy poszukiwano informacji na temat stali 45. Podobnie działo się w przypadku stali 30HGSA oraz stopu aluminium PA6. Potwierdza to fakt istnienia pól receptorowych skupiających informacje o własnościach zmęczeniowych. Kształt konturów z maksymalną wartością funkcji podobieństwa w środku i malejącą wartością ku brzegom obszaru wskazuje na istnienie atraktorów.

Wizualizacja rzeczywistego położenia atraktorów oraz postaci pól receptorowych prowadzi do wniosku, że zastosowanie analitycznych zależności i normatywnego planu badań prowadzi do ich skupienia na niewielkim obszarze przyjętego układu współrzędnych – rysunek 3. Tak zbudowany model charakteryzuje się ograniczonym obszarem stosowania, w porównaniu z ideą przedstawioną na rysunku 1, w której występuje niewielka liczba atraktorów z polami receptorowymi o dużych rozmiarach.



Rys. 3. Położenie atraktorów i ich pól receptorowych w zależności Morrowa za pracę [7]. Materiały uwzględnione na rysunku 2 scharakteryzowane zostały za pomocą R_m .

Jeżeli możliwe było zbudowanie spójnej teorii bazującej na idei atraktorów i jej potwierdzenie w obszarze wiedzy, który opisany jest dobrze zweryfikowanymi zależnościami analitycznymi, to można pokusić się o stworzenie modelu wchodzącego w obszarze, w którym nie są znane opisy analityczne.

4. UOGÓLNIENIE CHARAKTERYSTYKI ZMĘCZENIOWEJ Z WYKORZYSTANIEM IDEI ATRAKTORÓW

Obszarem, w którym idea atraktorów może znaleźć zastosowanie, jest wyznaczenie charakterystyk, dla których nie istnieją znane zależności analityczne. W niniejszej pracy weryfikacji będzie podlegała charakterystyka, dla której wartością szukaną jest trwałość zmęczeniowa określona dla próbek znormalizowanych [12], wykonanych z określonej grupy materiałów, tj. stali konstrukcyjnych wyższej jakości. Zastosowanie gładkich

próbek normatywnych umożliwia pominięcie na tym etapie rozważań parametrów związanych z geometrią próbek. Przyjęto realizację obliczeń w oparciu o zdeterminowane obciążenia sinusoidalne dla różnych wartości σ_a i σ_m . Proponuje się przeprowadzenie weryfikacji charakterystyki o następującym zapisie:

$$N = f\left(\sigma_a, \sigma_m, R_m, HB, \frac{Z_{so}}{Z_{rc}}, \psi_\sigma\right) \quad (1)$$

gdzie:

- σ_a – amplituda naprężenia cyklu,
- σ_m – naprężenie średnie cyklu,
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
- HB – twardość materiału w skali Brinella,
- $\frac{Z_{so}}{Z_{rc}}$ – współczynnik określający własności plastyczne materiału,
- ψ_σ – współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu.

Odwzorowanie f zostało zamodelowane w środowisku sztucznej sieci neuronowej w oparciu o proces treningu, mający na celu ustalenie atraktorów i pól receptorowych w obszarze zdefiniowanym przez przyjęte warunki badań. Stochastyczny charakter zjawisk zmęczeniowych zostanie uwzględniony w środowisku sztucznej sieci neuronowej przez odtworzenie własności statystycznych cech zmęczeniowych we własnościach statystycznych zbioru treningowego oraz zastosowanie bayesowskiej metody treningu sztucznej sieci neuronowej [5]. Poszukiwanie funkcji f będzie się odbywało w sztucznej sieci neuronowej o następującym ogólnym zapisie analitycznym:

$$\frac{N}{N_0} = \sum w_i(N, N_0) \times K_i \left(d_i \left(\frac{\sigma_a}{R_m}, \frac{\sigma_m}{R_m}, R_m, HB, \frac{Z_{so}}{Z_{rc}}, \psi_\sigma \right) \right) \quad (2)$$

gdzie

- $\frac{N}{N_0}$ – wektor wartości wyjściowych,
- $\frac{\sigma_a}{R_m}, \frac{\sigma_m}{R_m}, R_m, HB, \frac{Z_{so}}{Z_{rc}}, \psi_\sigma, N, N_0$ – wektor wartości wejściowych,
- w_i – bayesowska funkcja wagowa i -tego atraktora,
- d_i – funkcja wiążąca parametry trajektorie własności zmęczeniowych oraz współrzędne i -tego atraktora (funkcja kombinacji wejść w sztucznej sieci neuronowej),
- K_i – funkcja podobieństwa działająca w polu receptorowym i -tego atraktora (funkcja aktywacji sztucznego neuronu).

Najważniejszym elementem procesu budowy sztucznej sieci neuronowej jest utworzenie zbioru treningowego, tj. pozyskanie danych o zjawiskach zmęczeniowych o wysokim poziomie wiarygodności. Najlepszą metodą jest pozyskanie danych wprost z eksperymentu. Dla przyjętego sposobu poszukiwania atraktorów i ich pól receptoro-

wych ilość niezbędnych informacji uniemożliwia wykorzystanie wyłącznie danych eksperymentalnych. Zbiór treningowy zostanie przygotowany w oparciu o zweryfikowane dane literaturowe w odniesieniu do istniejącego stanu wiedzy poprzez zastosowanie ogólnie akceptowanych związków analitycznych. Proponuje się utworzenia przykładów do zbioru treningowego w oparciu o poniższy opis:

- W zaproponowanej charakterystyce podstawową zależnością jest $N = f(\sigma_a)$. Dane o wartościach N i σ_a mogą być odczytane wprost z wykresów Wöhlera dostępnych w katalogach [1, 13], a wyznaczonych dla ustalonej wartości współczynnika asymetrii cyklu R celem uwzględnienia wartości σ_m . W przypadku braku dostępu do danych tego rodzaju do pozyskiwania informacji wykorzystane zostaną charakterystyki dwuparametryczne. Na podstawie tych zależności dla losowych wartości współczynnika asymetrii cyklu R zostaną ustalone: wartość granicy zmęczenia Z_R oraz współczynniki a i b nachylenia prostej, odpowiednio w zakresie ograniczonej i nieograniczonej trwałości zmęczeniowej. Następnie metodą symulacji komputerowej wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, wziętą z pracy [12], w przykładzie treningowym uwzględniony zostanie stochastyczny przebieg zjawisk zmęczeniowych. Istotą metody jest przypisanie wielkościom N , a , b , Z_R rozkładów funkcji gęstości prawdopodobieństwa.
- Wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m są dostępne w literaturze [13] oraz katalogach materiałów [1]. Wielkość ta dla stali 10 podawana jest w przedziale wartości 410÷640 MPa, przy czym przedziały wartości R_m dla różnych materiałów mogą się częściowo pokrywać. Przyjęto rozpatrywać przedział wartości R_m jako funkcję jednostajnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa.
- Twardość według skali Brinella pochodzić będzie z danych literaturowych [1, 13]. W obliczeniach zostanie wykorzystana wartość maksymalna dla określonego stanu kwalifikacyjnego materiału.
- Wartości współczynnika wrażliwości materiału na asymetrię cyklu ψ_σ będą pochodzić z literatury [1, 13] lub zostaną wyznaczone na podstawie zależności analitycznych [3, 6].
- Wartości granic zmęczenia (niezbędne do obliczenia współczynnika ψ_σ oraz stosunku Z_{so}/Z_{rc}) zostaną wzięte z danych literaturowych [1, 13]. W przypadku braku możliwości pozyskania odpowiednich danych zostaną wykorzystane wzory przybliżone [3, 6], np.: $Z_{rc} = 0,33 R_m$, $Z_{rj} = (0,55 \div 0,63) R_m$, $Z_{so} = 0,25 R_m$.

Dane pozyskane z powyższych źródeł posłużą do określenia ilości oraz położenia atraktorów i ich pól receptorowych. W dalszej części obliczeń proponuje się wykorzystanie drugiego zbioru treningowego z danymi pochodzącymi z bezpośredniego eksperymentu. Celem zastosowania dwóch zbiorów treningowych, a w konsekwencji dwuetapowego procesu treningu sztucznej sieci neuronowej, jest uzyskanie możliwie dużej dokładności prognoz z uwzględnieniem stochastycznego charakteru zjawisk zmęczeniowych. W tym aspekcie jako wyzwanie rysuje się opracowanie odpowiedniego planu eksperymentu.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiono koncepcję wykorzystania sztucznej sieci neuronowej (traktowanej jako jedna z realizacji inteligencji obliczeniowej) do gromadzenia danych o procesach zmęczeniowych. Wprowadzone pojęcie atraktora pozwala mówić o informacjach na temat procesu zmęczeniowego w zdefiniowanym obszarze cech tego procesu.

Koncepcja ta została wstępnie zweryfikowana ze skutkiem pozytywnym, a wykres wartości miar podobieństwa (rys. 2) potwierdza funkcjonowanie danych wprowadzonych do sztucznej sieci neuronowej jako źródła informacji o znaczeniu zdecydowanie szerszym niż ma to miejsce w modelach analitycznych.

Przedstawiono propozycję uogólnienia podstawowej charakterystyki zmęczeniowej do postaci danej zależnością (1). Zaproponowano wybrane podejście do procesu pozyskiwania danych treningowych dla sztucznej sieci neuronowej.

Wyniki obliczeń dotyczące algorytmu generowania zbioru treningowego oraz przetwarzania danych w oparciu o pojęcie atraktorów zostaną przedstawione w trakcie Seminarium.

LITERATURA

- [1] Bazy Danych o Materiałach: System STALE – bazy: I, II, III, IV, V, KORSTAL, VI, VII, VIII, IX, X i XI. Tekoma-OIW Sp. z o.o., Warszawa 2004.
- [2] Hertz J., Krogh A., Palmer R.G.: Wstęp do teorii obliczeń neuronowych. WNT, Warszawa 1995.
- [3] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. WN PWN, Warszawa 1997.
- [4] Martyn T.: Fraktale i obiektowe algorytmy ich wizualizacji. Wyd. Nakom, Poznań 1996.
- [5] Masters T.: Sieci neuronowe w praktyce. WNT, Warszawa 1996.
- [6] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. WNT, Warszawa 1996.
- [7] Nowicki K.: Przetwarzanie danych eksperymentalnych o zmęczeniu materiałów i elementów konstrukcyjnych. Praca niepublikowana na prawach rękopisu Seminarium Wydziału Mechanicznego, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 2001.
- [8] Nowicki K.: Ocena niskocyklowej trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN „dla młodych pracowników nauki” Nr 7T07B00313, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1997.
- [9] Nowicki K., Sempruch J.: Ocena niskocyklowej trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej. Zmęczenie i mechanika pękania, XVIII Sympozjum Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji, ATR, Bydgoszcz-Pieczyska 2000, 353-366.
- [10] Nowicki K., Sempruch J.: Uogólnienie charakterystyki zmęczeniowej z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej. Zmęczenie i mechanika pękania, XIX Sympozjum Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji, ATR, Bydgoszcz-Pieczyska 2002, 291-297.
- [11] Polska Norma PN-84/H-04334: Badania niskocyklowego zmęczenia metali.
- [12] Polska Norma PN-76/H-04325: Badania metali na zmęczenie. Pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób.
- [13] Polska Norma PN-93/H-84019: Stal niestopowa do utwardzania powierzchniowego i ulepszenia cieplnego.
- [14] Szala J. i inni: Badanie procesu sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w zakresie niskocyklowego zmęczenia. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN numer 7T07A03508, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1997.
- [15] Zawisłak S.: Wyznaczanie rozkładów trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem hipotezy linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych metoda symulacji komputerowej. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Gdańsk 1990.