

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego  
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa  
Instytut Techniki Lotniczej

## **Streszczenie rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Rafał KIESZEK

### **WYKORZYSTANIE ALGORYTMU OPARTEGO NA SZTUCZNYCH SIECIACH NEURONOWYCH DO OPTYMALIZACJI ELEMENTÓW WIRUJĄCYCH SILNIKA TURBINOWEGO**

Promotor: płk dr hab. inż. Adam KOZAKIEWICZ, WML WAT

Promotor pomocniczy: ppłk dr inż. Robert ROGÓLSKI, WML WAT

W prezentowanej rozprawie zastosowano interdyscyplinarne podejście do procesu projektowania wybranych elementów wytrzymałościowych sprężarki silnika turbinowego jednoprzepływowego silnika odrzutowego. Założono, że połączenie Metody Elementów Skończonych (MES) i Sztucznych Sieci Neuronowych (SSN) pozwoli stworzyć efektywny pod względem czasu obliczeń program do analizy wytrzymałościowej elementów zespołów wirnikowych. Na podstawie powyższy założeń sformułowano cel rozprawy, którym było opracowania algorytmu opartego na SSN do optymalizacji wybranych elementów lotniczego turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego, celem optymalizacji zespołu sprężarkowego.

W pracy przedstawiono analizę literatury w obrębie wykorzystania Sztucznych Sieci Neuronowych w lotnictwie ze szczególnym uwzględnieniem maszyn przepływowych. Przeanalizowana literatura skupia się głównie na projektowaniu i optymalizacji oraz na diagnozowaniu i sterowaniu, z wykorzystaniem Sztucznych Sieci Neuronowych. Projektowanie i optymalizacja dotyczyła przede wszystkim obliczeń gazodynamicznych turbin, ich pola prędkości i temperatur z wykorzystaniem metody objętości skończonych. W wyniku analizy literatury wykryto braki w wykorzystaniu Sztucznych Sieci Neuronowych do predykcji naprężeń w elementach wirnikowych lotniczych silników turbinowych. Opisano także wykorzystywane algorytmy sztucznej inteligencji. Przedstawiono idee działania algorytmu genetycznego, który w dalszej części pracy uległ modyfikacji. Ponadto opisano model matematyczny Sztucznych Sieci Neuronowych i różne metody ich uczenia.

Przeprowadzono szerokie badania numeryczne nad możliwością i zasadnością zastosowania i strukturą Sztucznych Sieci Neuronowych do wspomaganie obliczeń wytrzymałościowych. Do badań wykorzystano programy MATLAB lub ANSYS wraz z językiem APDL, połączone rekurencyjnie. Ponieważ istnieją szerokie braki w literaturze w wyżej wymienionej dziedzinie, badania rozpoczęto od przypadków trywialnych. Pierwszym analizowanym zagadnieniem była predykcja rozkładu naprężeń w belce wysięgnikowej o stałym przekroju dwuteowym obciążonej siłą skupioną. Zdecydowano się na taki model z uwagi na bardzo łatwą weryfikację uzyskanych wyników. Rozwiązanie przedstawionego problemu dostarczyło wiedzę, że Sztuczna Sieć Neuronowa typu NARX 4-15-15-1

(ang. *Nonlinear Autoregressive with External (Exogenous) Input*) może rozwiązywać proste problemy inżynierskie. Wiedza ta została potwierdzona poprzez zastosowanie podobnej sieci do wyznaczenia rozkładu naprężeń zredukowanych w tarczy prostej obciążonej ciągnięciem wieńcowym.

Po uzyskaniu wiedzy, że Sztuczne Sieci Neuronowe mogą przewidzieć rozkład naprężeń w tarczy prostej podjęto udaną próbę optymalizacji tarczy profilowanej za pomocą algorytmu genetycznego. Funkcją celu była minimalizacja masy z uwzględnieniem funkcji kary w przypadku przekroczenia naprężeń dopuszczalnych. Naprężenia zredukowane były wyznaczone początkowo przez opracowany algorytm MES, a następnie na ich podstawie trenowano Sieci Neuronowe. Wartość kary była zależna od naprężeń wyznaczonych przez SSN). Zastosowana autorska modyfikacja algorytmu genetycznego poprzez wprowadzenie chwilowej, zmiennej przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych pozwoliła zmniejszyć czas pracy samego algorytmu genetycznego. Optymalizujący algorytm genetyczny wyliczał wartość funkcji kary jedynie w oparciu o Sieci Neuronowe, walidując wyniki co pewną, wybraną liczbę pokoleń. Pozwoliło to znacznie zmniejszyć czas wyznaczania wartości funkcji kary i całej optymalizacji (o około 40%). W wyniku przeprowadzonych badań zrezygnowano z sieci typu NARX na rzecz sieci typu FeedForward, ponieważ sieci NARX uczyły się dłużej i z mniejszą dokładnością.

Celem dalszego zmniejszenia czasu pracy algorytmu, podjęto próbę optymalizacji struktury oraz algorytmu uczenia Sztucznych Sieci Neuronowych. W pierwszej kolejności porównano jakość uczenia sieci neuronowej o od jednej do czterech warstw ukrytych i 25 lub 50 neuronach w każdej warstwie za pomocą trzech wybranych algorytmów uczenia: metody gradientów sprzężonych z regulacją (SCG), metody momentum (GDM) i algorytmu sprężystej propagacji wstecznej (RPROP). W kolejnym etapie porównano jakość uczenia w zależności od względnej rozpiętości danych uczących ( $\pm 5\%$  lub  $\pm 10\%$ ). Przeprowadzono także optymalizację struktury sieci, gdzie minimalizowano wartość bezwzględną średniego błędu względnego i odchylenie standardowe. Pozwoliło to nakreślić fronty Pareto, na podstawie których wskazano optymalną sieć neuronową o strukturze NN 20-2-1 uczoną metodą gradientów sprzężonych z regulacją (SCG).

Opracowaną modyfikację algorytmu genetycznego połączono z zoptymalizowaną Sztuczną Siecią Neuronową tworząc algorytm minimalizujący masę tarczy sprężarki o konstrukcji tarczowo-bębnowej. Przeprowadzono optymalizację dziesięciu wybranych stopni sprężarki silnika AŁ21F-3. W oparciu o MES generowane były rozkłady naprężeń dla losowo wygenerowanych tarcz, które posłużyły za przypadki uczące sieci neuronowe. Naprężenia te zostały uwzględnione w funkcji celu jako funkcja kary. Algorytm genetyczny nie korzystał z danych wygenerowanych przez MES a jedynie z danych aproksymowanych przez sieci neuronowe. Model numeryczny MES został zwalidowany za pomocą obliczeń analitycznych poprzez sprowadzenie go do tarczy prostej, obciążonej ciągnięciem wieńcowym. Błąd względny naprężeń modelu nie przekraczał 1%, z wyłączeniem okolicy części bębnowej.

Wyniki optymalizacji porównano z analizą MES w programie ANSYS Workbench. Regresja naprężeń wyznaczonych przez MES i SSN wynosiła nie mniej niż 0,99 przy naprężeniach niedoszacowanych średnio o 4,5%. Całkowity czas pracy algorytmu optymalizującego dla dziesięciu wybranych stopni sprężarki wyniósł około 8-10 godzin. Wyniki badań numerycznych potwierdziły, że połączenie MES i SSN pozwoli stworzyć efektywny pod względem czasu obliczeń program do analizy wytrzymałościowej elementów zespołów wirnikowych.