

# Sieci neuronowe w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji i materiałów

## STRESZCZENIE

Przedmiotem rozważań niniejszej pracy jest analiza numeryczna wybranych zagadnień mechaniki konstrukcji i materiałów z wykorzystaniem sieci neuronowych. Wszystkie obliczenia wykonywane były za pomocą, w różnym stopniu ze sobą zintegrowanych, dwóch technik obliczeniowych, tj. obliczeń standardowych (twardych) (ang. *hard computing* OT), do których należy metoda elementów skończonych (MES), oraz tzw. obliczeń miękkich (ang. *soft computing* OM), do których zalicza się sztuczne sieci neuronowe (SN).

Zaletą sformułowanych systemów hybrydowych jest wzajemne uzupełnianie się i rozszerzanie pozytywnych cech użytych komponentów. W zastosowanej w pracy koncepcji hybrydowej podstawę budowanych systemów hybrydowych pełni metoda elementów skończonych, która nadaje się wyłącznie do rozwiązywania zagadnień bezpośrednich. Natomiast sieci neuronowe, szczególnie sprawdzające się w analizie problemów odwrotnych, stanowią drugą metodologię obliczeniową. Ze względu na dużą przydatność do realizacji zadań przedstawionych w pracy, skupiono się wyłącznie na jednokierunkowych sieciach warstwowych ze wsteczną propagacją błędów (SWPB). Opracowano dwa typy systemów hybrydowych, charakteryzujących się różnymi stopniami i strukturami integracji. We wszystkich rozpatrywanych problemach komponenty MES i SN były integrowane techniką *off line*, czyli w fazie projektowania systemu hybrydowego.

Praktyczne zastosowanie opracowanych programów obliczeniowych prezentowane jest na przykładzie trzech problemów badawczych (problemy P1-P3), odnoszących się do wybranych zagadnień mechaniki konstrukcji i materiałów.

Pierwszy problem (P1) dotyczył identyfikacji parametrów materiału sprężysto-plastycznego. Do tego celu zastosowano system hybrydowy MES-SWPB, charakteryzujący się niskim stopniem itegracji użytych komponentów. W tym przypadku sieci neuronowe były wykorzystane do rozwiązania problemu odwrotnego i służyły do wyznaczenia wybranych parametrów materiału opisanego za pomocą potęgowego prawa Ramberga-Osgooda. Podczas analizy identyfikowano moduł Younga, granicę plastyczności i parametr wzmocnienia materiału. Do formułowania sieci neuronowych jednokierunkowych ze wsteczną propagacją błędów wykorzystano pseudo eksperymentalne zbiory danych, udostępnione dzięki uprzejmości grupy prof. G. Maiera z Politechniki Mediolańskiej. Dane te zawierały współrzędne krzywych indentacji oraz profili odcisku i zostały wygenerowane podczas symulacji testu indentacji próbki stalowej. Test numeryczny przeprowadzono za pomocą programu MES ABAQUS/CAE. Dążąc do ograniczenia liczby wejść do sieci neuronowych, uniknięcia efektu ponad przylegania a także poprawienia zdolności uogólniających sieci, zastosowano kompresję danych. W tym celu wykonano aproksymację każdej z gałęzi otrzymanych krzywych. Zastosowano dwie procedury

identyfikacji: P-A i P-C. W procedurze P-A identyfikacja parametrów materiału odbywała się na podstawie współrzędnych krzywych indentacji, natomiast procedura P-C wykorzystywała współrzędne opisujące jedynie profil odcisku. Na podstawie analizy otrzymanych wyników wykazano, że zaproponowane podejście hybrydowe łączące MES i SN skutecznie rozwiązuje postawione zadanie analizy odwrotnej i z powodzeniem może być wykorzystane do identyfikacji parametrów materiału sprężysto-plastycznego.

Kolejny analizowany problem (P2), realizowany w tej pracy, dotyczył analizy niezawodności przestrzennych konstrukcji kratowych. W tym celu należało zbudować system hybrydowy charakteryzujący się prostą strukturą integracji zastosowanych elementów. System tworzyły dwie pracujące sekwencyjnie niezależne aplikacje MES oraz SN. Program MES został zastosowany do przygotowania wzorców uczących i testujących sieć neuronową. W tym problemie nauczona jednokierunkowa sieć warstwowa SWPB służyła do szybkiego generowania pseudolosowych próbek w symulacjach hybrydowej metody Monte Carlo (HMC), tzn. sieć określała nośność graniczną konstrukcji prętowych dla każdego przyjętego wektora zmiennych losowych. Warto zaznaczyć, że mimo bardzo prostego stopnia integracji użytych elementów system hybrydowy MES-SWPB okazał się wyjątkowo efektywny do obliczania prawdopodobieństwa niezawodności w porównaniu z posługiwaniem się wyłącznie MES.

W celu analizy problemu P3 zbudowany został system hybrydowy charakteryzujący się wysokim stopniem integracji komponentów. W tym przypadku analizy sieć neuronowa typu SWPB pełniła rolę neuronowego modelu materiału (NMM). Parametry NMM były kalibrowane w trybie *off line* za pomocą pseudo empirycznych wzorców wygenerowanych z prawa RO. Obliczenia wykonano za pomocą programu hybrydowego MES/NMM<sub>RO</sub>, w którym wcześniej sformułowany NMM<sub>RO</sub> opisywał model materiału a także umożliwiał bezpośrednie wyznaczenie operatora stycznego. Analiza wyników obliczeń wykazała, że sieć SWPB jest efektywna numerycznie i może z skutecznym zastępować prawo fizyczne w programie MES. Zbudowany model obliczeniowy służył z powodzeniem do złożonej analizy przystosowania (ang. *shakedown*) sprężysto-plastycznego układu prętowego poddanego obciążeniom zmiennym.

Beata Potnieszczak-Sud

Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych

doktorant: **mgr inż. Beata Potrzeszcz-Sut**

promotor: **dr hab. inż. Ewa Pabisek, prof. PK**

## **Neural networks in selected problems of mechanics of structures and materials**

### SUMMARY

The subject matter of this dissertation is the numerical analysis of selected issues of structural mechanics and materials based on neural networks. All computation were carried out by two computational techniques, with varying degrees of integration, i.e. hard (standard) computing (HC), which includes the finite element method (FEM) and the so-called soft computing (SC), which includes artificial neural networks (NN).

The advantage of formulated hybrid systems is the complementarity and enlargement of the positive features of the applied components. In the hybrid strategy used in this study, the basis of the developed hybrid systems is the finite element method, only suitable for direct problems solving.

Neural networks, which are particularly useful in the analysis of inverse problems, represent the second computational methodology. Due to the great usefulness of carrying out the tasks presented in the study, it concentrates solely on feed-forward layered Neural Network with Back-Propagation (BPNN).

Two types of hybrid systems were developed, characterized by different levels and structures of fusion. In all the problems discussed, the FEM and NN components were integrated by an *off line* technique, or in the design phase of the hybrid system.

The practical application of the developed computational programs is presented on the example of three research problems (problems P1-P3) referring to selected issues of structural and materials mechanics.

The first problem (P1) concerned the identification of the parameters of the elastic-plastic material. For this purpose, the weakly integrated hybrid system of FEM-BPNN was used. In this case, to solve the inverse problem, neural networks were used and they were served to determine the selected parameters of the material described by the Ramberg-Osgood power-law. During the analysis, the following features were identified: Young's modulus, yield strength, and material gain parameter. For the formulation of feed-forward back-propagation neural networks, pseudo-experimental data sets were used, courtesy of

prof. G. Maier from the Polytechnic of Milan. These data included the indentation curves and imprint profiles and were generated during the indentation test simulation of the steel sample. The numerical test was performed by using the ABAQUS/CAE FEM program.

Data compression was applied in order to reduce the number of inputs to the neural networks, to avoid over-fitting and to improve the ability of generalising networks. An approximation of each branch of the obtained curves was used for this purpose.

Two identification procedures were applied: P-A and P-C. In the P-A procedure the identification of material parameters was based on the indentation curves coordinates, while the P-C procedure used coordinates describing only the imprint profiles. On the base of the analysis of the obtained results, it was shown that the proposed hybrid approach merging MES and SN effectively solves the inverse task and can be successfully used to identify the parameters of the elastic-plastic material.

Another problem (P2) analysed in this dissertation was the reliability analysis of the spatial trusses. For this purpose, it was necessary to build a hybrid system characterized by a simple structure of integration of applied components. The system was formed with two independent sequentially working FEM and NN applications. The FEM program was used to prepare patterns for learning and testing the neural networks. In this problem, to rapidly generate pseudo-random samples in the Monte Carlo hybrid simulation (HMC) a trained layered feedforward PBNN network was used, that is to say, the network was determined the limit load capacity of the steel space structures for each assumed vector of random variables. It is worth noting that despite a very simple degree of integration of the applied components, the FEM-PBNN hybrid system proved to be exceptionally effective in computing the probability of reliability as against to using only MES.

In order to analyse the third problem (P3), a hybrid system with a high level of component integration was built. In this case, PBNN neural network acted as a Neural Material Model (NMM). NMM parameters were calibrated in the *off line* mode by using pseudo-empirical patterns generated from the RO law. Computations were made using the FEM/NMM<sub>RO</sub> hybrid program, where the previously formulated NMM<sub>RO</sub> described the material model, and it also allowed for the direct determination of the tangent operator. Analysis of the calculation results showed that the PBNN network is numerical effectively and can efficiently replace the physical law in the FEM program. The formulated computational model was used successfully to the complex shakedown analysis of the elastic-plastic steel bar structure under altered loads.

Beata Potrzebna-Sit