Sieci neuronowe w mechanice konstrukcji metalowych: nowa dojrzała metoda obliczeniowa
Neural networks in mechanics of metal structures: a new mature computational method

Zenon Waszczyszyn[1*],
Ewa Pabisek[2], **Bartosz Miller**[1], **Joanna Kaliszuk**[3]
[1]*Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, ul Poznańska 2, 35-959 Rzeszów, e-mail:{zewasz, bartosz.miller}@prz.edu.pl zenwa@l5.pk.edu.pl*

[2]*Istytut Technologii Informatycznych w Inż. Lądowej Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków e-mail:epabisek@ l5.pk.edu.pl*

[3]*Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Uniwersytet Zielonogórski, ul Licealna 9, 65-414 Zielona Góra, e-mail: j.kaliszuk@ib.uz.zgora.pl*

Streszczenie

Od roku 1956 działa nieformalna Grupa Badawcza związana z zastosowania Sieci Neuronowych w inżynierii lądowej (w skrócie GBNN). Uczestnicy GBNN z 7-miu polskich wyższych uczelni skupili się wokół stałego Seminarium i rozwinęli obszerną działalność naukowo-badawczą. Przedstawiany referat obejmuje wybór 4-ch problemów z zakresu stosowania SN w mechanice konstrukcji metalowych. Celem referatu jest pokazanie szerokich możliwości stosowania SN w zagadnieniach predykcji i identyfikacji, formułowanych w analizie konstrukcji metalowych.

Abstract

An informal Research Group on applications of Neural Networks in civil engineering (in short RGNN) was organized in 1956. The participants of RGNN, collected from seven Polish technical universities and gathered at a standing Seminar developed a great research activity. The presented paper deals with four selected problems corresponding to applications of NN in mechanics of metal structures. The main goal of the presented paper is to point out a wide possibility of NN applications in the analysis of prediction and identification problems, formulated in the analysis of metal structures.

Słowa kluczowe: sieci neuronowe, grupa badawcza, stałe seminarium, predykcja, identyfikacja, konstrukcje metalowe
Keywords: neural networks, research group, standing seminar, prediction, identification, metallic structures

1. Wstęp

1.1 Sieci neuronowe w inżynierii

Sieci Neuronowe (SN), nazywane też Sztucznymi SN, należą do grupy metod inspirowanych biologicznie (nazywanych też metodami miękkimi lub metodami obliczeniowymi sztucznej inteligencji). W triadzie metod SN–AG–SR (gdzie: AG-algorytmy genetyczne, SR – systemy rozmyte) SN pełnią rolę podstawową. Historia sieci neuronowych sięga lat 40-tych ubiegłego wieku, ale istotny renesans ich rozwoju łączymy z rokiem 1986 i działalnością D. Rumelharda i J. McClellcand w MIT, USA. W 1989 r. przedstawiono pierwsze referaty na kongresie AICE'89 poświęcone zastosowaniom SN w inżynierii lądowej i wodnej. W Europie podobną działalność rozpoczął w 1991r. B.H.C. Topping na Heriot Watt University, Edinburg, UK. W Polsce pionierska rolę spełnił R. Tadeusiewicz publikując w 1993r. pierwszą monografie na temat SN w języku polskim.

1.2. SN w polskiej inżynierii lądowej

Na przełomie lat 1995/96 Z. Waszczyszyn (dalej akronim ZW) zorganizował przy Instytucie Metod Komputerowych w Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej (PK) nieformalną grupę badawczą związaną z zastosowaniami sztucznych sieci w inżynierii lądowej (dalej skrót GBSN) oraz stałe seminarium (SemSN) związane z GBSN. Najpierw wykorzystano SemSSN

1. Introduction

1.1. Neural networks in engineering

Neural Networks (NN), also called Artificial NN, belong to a group of biologically inspired methods (also called either soft or intelligent methods). In the triad NN–GA–FS (where: GA – genetic algorithms, FS – fuzzy systems), the NN play basic role. The history of NN reaches beginning of the 1940s, but the essential modern renaissance corresponded to 1986 due to scientific activity of DF. Rummelhard and J. Mccleland from MIT, USA.. In 1989, the first papers on applications of NN in civil engineering were presented at the AICE'89 congress. A similar activity in Europe was developed B.H.C. Topping in 1991 at the Heriot Watt University in Edinbug, UK.. R. Tadeusiewicz in 1993, published the first book in Polish in1993.

1.2. NN in Polish civil engineering

At the turning of 1995/96, Z. Waszczyszyn (marked for short ZW) organized an informal Research Group on Applications of NN in Civil Engineering (RGNN fo short) at the Institute of Computer Methods in Civil Engineering at the Cracow University of Technology. The standing Seminar (called for short SemNN) was also organized as an important part accompanying the RGNN. At the beginning the SemNN was useful as a basis for learning the NN and understand them deeper. Next, SemNN became a forum for scientific discussions

dla uczenia się i poznania warsztatu SN, potem dla wymiany wiedzy, dyskutowania wyników z ciekawych prac i badań Ing własnych, przedstawiania tez referatów na konferencje naukowe i kursy szkoleniowe, jak też koncepcji rozwijanych w dysertacjach doktorskich i habilitacyjnych. Rozpoczęto również zapraszanie gości z kraju i z zagranicy z referatami.

Do grupy krakowskiej, złożonej z pracowników PK, dołączyli uczestnicy z Akademii Rolniczej w Krakowie i liczna grupa z Politechniki Rzeszowskiej. Następni uczestnicy dołączyli z Politechnik Zielonogórskiej, Wrocławskiej, Łódzkiej i Białostockiej. Oprócz podstawowej działalności związanej z przygotowywaniem rozpraw doktorskich i habilitacyjnych, włączono się do realizacji projektów badawczych, przygotowywania wystąpień na konferencjach i kursach szkoleniowych oraz pomocy w organizowaniu konferencji krajowych i zagranicznych.

15-letni okres działalności GBSN i SemSN został opisany przez ZW w dwóch dużych pracach przeglądowych [1,2]. Przedstawiono tam twórczy rozwój naukowy uczestników rozpoczynając od stosowania prostych sieci warstwowych do analizy elementów konstrukcji. Potem były rozwijane rozmyte i metody bayesowskie. Wiele uwagi poświecono rozwijaniu hybrydowych systemów obliczeniowych, służących analizie wprost w odniesieniu do całych konstrukcji i ich łączeniu z identyfikacją parametrów materiałowych.

Dzięki aktywności GBSN, uczestnicy Grupy byli rozxpoznawalni i chętnie zapraszani przez różne, krajowe i zagranicznie uczelni oraz inżynierskie ośrodki badawczych.

2. Wybrane problemy stosowania SN w mechanice konstrukcji metalowych

Z dużej liczby zagadnień analizowanych przez uczestników GBSN wybrano 5 problemów, które ilustrują specyficzne właściwości SN i efektywność ich zastosowania. Przedstawione problemy łączy ich modelowanie jako zagadnienia regresji matematycznej, specyfikowanej do analizy problemów symulacji i identyfikacji..

2.1. Predykcja obciążeń krytycznych dla osiowo ściskanych powłok cylindrycznych z imperfekcjami geometrycznymi (Rys.1)

Analizą objęto 31 powłok stalowych z imperfekcjami odchyleń od idealnej powierzchni środkowej, mierzonymi w (15×21) węzłach równomiernej siatki prostokątnej (Rys. 1b), por. [3]. Do analizy zastosowano tzw. „replikator", tj. auto asocjacyjną sieć warstwową. Replikator zastosowano do kompresji danych. Wykazano, że proponowane podejście prowadzi do SN warstwowej o architekturze 8-5-1, która daje oszacowanie wartości średniej obciążenia krytycznego z dokładnością ± 2.4 %, nieosiągalną przez wcześniej stosowane metody obliczeniowe.

2.2. Predykcja niezawodności dwóch konstrukcji stalowych (Rys. 2 i 3)

Uwagę skupiono na analizie niezawodności tzw. ramy kalibrującej wykonanej ze stali konstrukcyjnej. Przyjęto model materiału idealnie sprężysto-plastycznego, z 2-ma lub 3-ma losowymi imperfekcjami dla wartości granicy plastyczności rygli R_b i słupów R_s oraz kąta nachylenia słupów Ψ_0 , por. Rys.2.

Obliczenia rozdzielono na 2 etapy, por. [4]. W pierwszym

on basic ideas and recent results. Theses of papers for conference presentations, suggestions of PhD and DSc dissertations, as well as proposals for summer courses were also in the centre of attention. Then, well known professors and specialists on NN were invited from Poland and abroad to read their lectures.

The original, Cracovian part of RGNN was composed of participants of Cracow UT, Academy of Agriculture, Cracow, and some participants from the Rzeszow UT. The next participants were collected from the Technical Universities of Zielona Gora, Wroclaw, Lodz and Bialystok. Besides the basic activity at the PhD and DS theses, research projects were carried out at the home universities, having support of other participants of RGNN. The organization of scientific conferences on NN applications in Poland and abroad is also worth mentioning.

The period of fifteen years activity of RGNN and SemNN was described by ZW in two state-of-the-art papers [1, 2]. A creative development of the papers level started from applications of layered neural networks in the analysis of structural elements. Then, the fuzzy networks and Bayesian methods were developing. A great deal of attention was devoted to the development of hybrid computational systems. The system could be applied for joining the prediction and reverse analysis of complex problems.

Due to activity of RGNN, its participants have been well recognized and invited to participate in research projects in Poland and abroad.

2. Selected problems in which NN were applied in mechanics of metal structures

From among many problems analyzed by the RGNN participants five problems were selected, which illustrate special possibilities and numerical efficiency of NN applications. The presented problems are related to the mathematical regression, specified for the analysis of both simulation and identification topics.

2.1. Prediction of critical loads for axially compressed cylindrical shells with geometrical imperfections (Fig.1)

The analysis covers 31 steel shells with random deviation off the perfect midsurface, measured at 15×25 nodes of the regular orthogonal mesh, see Fig.1. The replicator, i.e. the auto-associated layered NN was applied for the analysis of the problem. First of all, the replicator was applied for data compression. Then, it was used for formulating the NN of architecture 8-5-1. The network was applied for the estimation of critical loads. It was proved that the average relative errors are ca. ± 2.4 %. Such errors are lower than those published in previous papers.

2.2. Prediction of reliability of two steel structures (Figures 2 and 3)

An attention was focused on the analysis of the so called calibrated plane frame made of constructional steel, see Fig.2. The elastic-plastic model of material was adopted and two or three random parameters. They corresponded to the yield points of beams and columns, R_b and R, as well as to the inclination angle of columns Ψ_0

The computations divided into separated for two stages, see

etapie wygenerowano za pomocą programu MES dwie SN i w trybie 'off line' obliczono wzorce do liczenia próbek w metodzie Monte Carlo. Symulacje komputerowe wykazały, że czasy obliczeń prawdopodobieństw osiągnięcia obciążeń granicznych są prawie 8-krotnie krótsze niż dla wzorców liczonych wyłącznie za pomocą MES.

Drugim problemem jest obliczanie niezawodności blachownicy stalowej o danych jak na Rys. 3. Celem generowania wzorców do uczenia i testowania SN posłużono się programem MES COCMOS/N. Zastosowanie podejścia naszkicowanego wyżej dało czasy CPU obliczeń krzywej niezawodności rzędu ok. 10^5 sec. krótsze niż przy hipotetycznym stosowaniu MES do obliczania każdej próbki w metodzie MC.

2.3. Stosowanie hybrydowego modelu obliczeniowego do strojenia modelu numerycznego prostej ramy płaskiej (Rys. 4).

Przedstawiony problem jest przykładem pełnej identyfikacji za pomocą systemu hybrydowej metody obliczeniowej (HMO), opracowanej w [5]. HMO zastosowano do identyfikacji parametrów dwóch modeli obliczeniowych FRAME I oraz FRAME II płaskiej ramy portalowej, pokazanej na Rys. 4. Obliczone parametry sprawdzono na częstotliwościach drgań własnych analizowanych modeli. Okazało się, ze korzystniejszy jest model FRAME II, gdyż dla 4-ch pierwszych częstotliwości daje błędy względne nie większe niż ok. 4%, ale mniejsze od błędów dla modelu FRAME I. Istotnym krokiem modelowania było wprowadzenie zaszumionych wzorców do uczenia SN.

2.4. Zastosowanie systemu HMO do identyfikacji wewnętrznych parametrów cienkościennej belki o przekroju prostokątnym (Rys. 5)

System HMO został wykorzystany do identyfikacji 3-ch wewnetrznych parametrów belki cienkościennej pokazanej na Rys. 5, por. [5]. Identyfikowano moduł sprężystości E, współczynnik kształtu przekroju k_s oraz tłumienia drgań γ. Posłużono się siecią neuronową o 2-ch warstwach ukrytych i wzorcami zaszumionymi. Dokładność identyfikacji wymienionych parametrów była tak duża, że model MES dostrojono dla 5-ciu pierwszych częstotliwości z dokładnością do ok. 0.8%.

[4]. The first stage was related to generating the Monte Carlo method (MC) trials. They were computed in the 'off line' mode by means of two NN, basing on a FEM program. The evaluation of computer simulations indicated that the CPU time needed for construction of the probability curve was about 8 times lower than for all the trials computed by the FEM program.

The other problem concerns the reliability analysis of a steel girder shown in Fig. 3. For computer simulation of the patterns for the NN learning and testing, the FEM code COSMOS/N was applied. The hybrid approach, extended in comparison with that formulated for the reliability analysis the calibrated frame, was of order 10^5 times shorter than the hypothetical time for the computation the of MC trials by FEM.

2.3. Application of hybrid computational system for tuning of numerical models of a simple plane frame (Fig. 4).

The presented problem is a good example of the full tuning of structural numerical models by the Hybrid Computational System (HCS), developed in [5]. The HCS was applied in the identification of parameters of two models marked FRAME I and FRAME II. The computed parameters were verified on the analyzed model eigenfrequencies. It was proved that the model FRAME II is better than Frame I since for the first four eigenfreguencies the average relative errors are not higher than circa 4%, but smaller than the errors computed for the model FRAME I. The essential step of the numerical modeling was the introduction of noisy data for network learning.

2.4. *Application of the system HCS for identification of internal parameters of a thin-walled beam of rectangular cross-section (Fig. 5)*

The Hybrid Computational System (HCS) was applied for the identification of three internal parameters of a thin-walled beam shown in Fig.5, i.e. modulus of elasticity E, coefficient of cross-section shape k_s and internal dumping parameter γ. A network with two hidden layers was adopted and artificial noisy data were introduced. The accuracy of identification was very high since, after the FEM model was tuned, the first five beam frequencies could be computed with relative error ca. 0.8%.

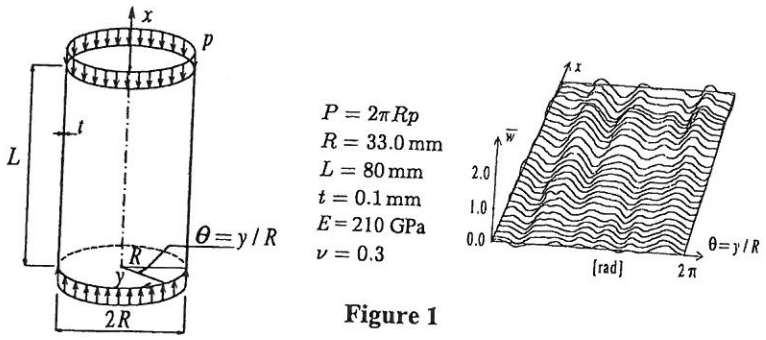

Figure 1

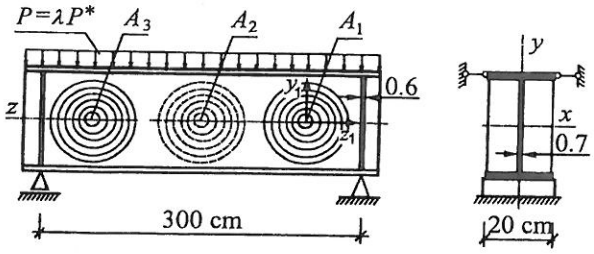

Figure 3

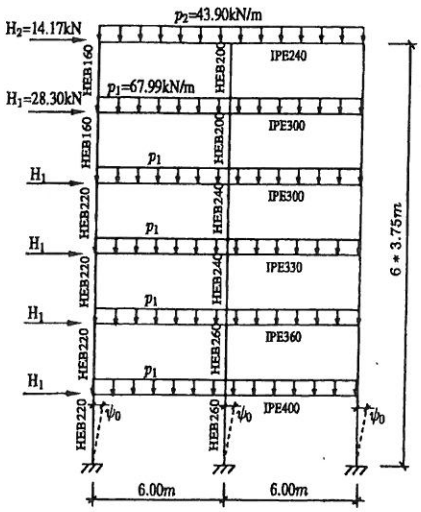

Figure 2

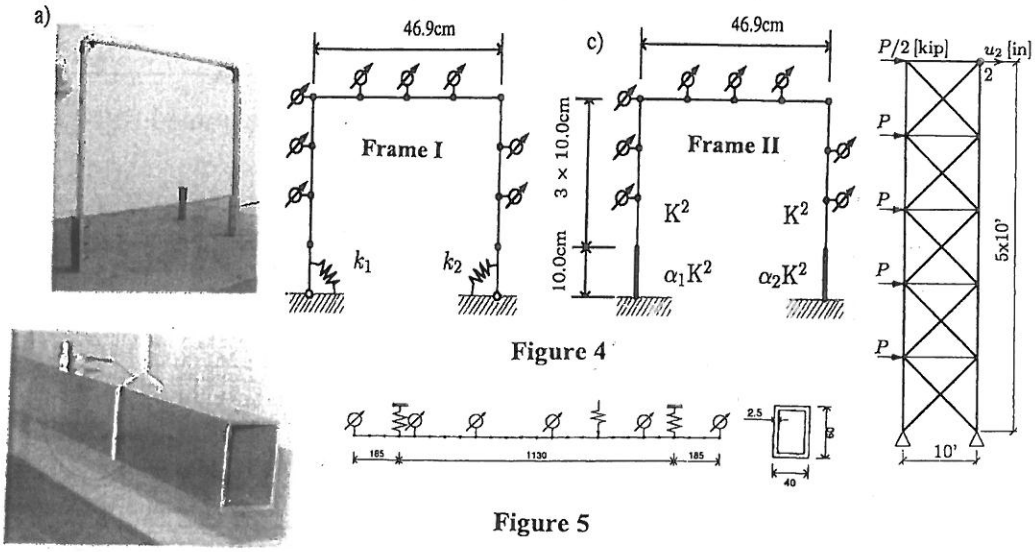

Figure 4

Figure 5

Areas of truss members:
verticals: $A = 12$ in^2
horizontals and diagonals: $A = 4$ in^2
where:
1in = 25.4 mm
1in^2 = 642.2 mm^2
1kip = 4.448 kN

Figure 6

2.5. Identyfikacja neuronowego modelu materiału płaskiej kratownicy (Rys. 6) i tarczach sprężysto -plastycznych

Z monografii habilitacyjnej E. Pabisek [6] wzięto prosty przykład kratownicy płaskiej, por. Rys. 6. Ta kratownica jest w literaturze przyjęta jako przykład wzorcowy ('bench-markowy') do weryfikacji algorytmu systemu HMO złożonego z 3-ch komponentów, tj. MES, SN i znanej zależności u_i (P), gdzie: u_i – przemieszczenie wybranego punktu i na poziomie konstrukcji, P – parametr obciążenia. Istotą zastosowanego systemu hybrydowego jest generowanie wzorców SN w trakcie rozwiązywania dwu-etapowego układu równań przyrostowych MES. W analizowanym przykładzie pseudo-pomiarową zależność u_i (P) obliczono dla materiału Ramberga-Osgooda (RO). Wykazano, że iteracyjny przebieg obliczeń jest szybko zbieżny i po 3-ch iteracjach otrzymano punkty neuronowego modelu materiały, leżące blisko krzywej analitycznej RO.

W pracy [6] wyżej opisany algorytm metody HMO zastosowano też do identyfikacji nieznanego 'a priori' materiału płaskich, tarcz metalowych. Wykazano, ze system HMO umożliwia numerycznie efektywnie identyfikować neuronowe modele sprężysto-plastyczne w tarczach prostokątnych z otworem lub załamaniami (karbami) brzegów prostoliniowych.

2.5. Identification of neural material model in a plane truss (Fig. 6) and elastic-plastic plates

A simple example of a plane truss, see Fig. 6, was taken from the monograph [6] written by E. Pabisek. This truss was applied in many papers as a benchmark test for the verification of the HCS algorithm. It was composed of three components corresponding to FEM, NN and to a known relation u_i (P), where: u_i – displacement of the i-th point on structural level, P – load parameter. The main idea of the adopted HCS system lied in the generation of NN patterns in the course of the FEM two-stage analysis. In the presented example, the pseudo-empirical relation u_i (P) was simulated for the Ramberg–Osgood (RO) model of material. It was proved that iteration procedure is quickly convergent. After three iterations the simulated points of neural material model were placed close to the analytical curve of the RO model.

In paper [6] the above sketched HCS algorithm was also applied to the identification of the 'a priori' unknown material of plane steel plates. It was proved that the system HCS enables identification of elastic-plastic neural material models with a great numerical efficiency. This was verified is cases of steel orthogonal plates with either a hole or notched boundaries.

Literatura• References

[1] Waszczyszyn Z., (2006), *Artificial neural networks in civil and structural engineering: Ten years of research in Poland,* Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol. 13, No.4, pp.489-512.

[2] Waszczyszyn Z., (2006), *Artificial neural networks in civil and structural engineering: Another five years of research in Poland,* Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol. 18, No.3, pp.131-146.

[3] Waszczyszyn Z., Bartczak M., (2003), *Neural prediction of critical loads in compressed cylindrical shells with geometrical imperfections*, Non-linear Mechanics, Vol.37, pp. 763-775.

[4] Kaliszuk J., (2005), *Reliability analysis of structures and structural elements by means of artificial neural networks* (in Polish), PhD Thesis, University of Zielona Góra.

[5] Miller B., (2001), *Tuning of the mathematical model of structures to physical models* (in Polish), PhD Thesis, Rzeszów University of Technology.

[6] Pabisek E., (2008), *Hybrid systems integrating FEM and ANN for the analysis of selected problems of structural and material mechanics* (in Polish), Monograph No 369, Cracow Univ. of Technology.