

Prof. dr hab. inż. Krystyna Kuźniar
Uniwersytet Pedagogiczny
im. Komisji Edukacji Narodowej
Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny
Instytut Techniki
ul. Podchorążych 2
30-064 Kraków

Kraków, 15.12.2017r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Beaty Potrzeszcz-Sut

**pt.: *Sieci neuronowe w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji
i materiałów***

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowałam na prośbę Pana Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr hab. inż. Marka Iwańskiego, której podstawą była uchwała Rady Wydziału z dnia 18.10.2017r.

2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy

Zasadniczym celem naukowym recenzowanej rozprawy doktorskiej była numeryczna analiza trzech typów problemów mechaniki materiałów i konstrukcji: problemu identyfikacji parametrów materiału sprężysto-plastycznego z wykorzystaniem wyników testu indentacji, problemu analizy niezawodności kratownic przestrzennych metodą Monte Carlo oraz problemu formułowania modelu materiału konstrukcji. W obliczeniach dotyczących tych zagadnień Autorka zaproponowała połączenie właściwości i potencjału sztucznych sieci neuronowych jako tzw. obliczeń miękkich oraz techniki tzw. obliczeń twardych – metody elementów skończonych, umiejętnie konstruując odpowiednie systemy hybrydowe. Modelowanie procesów przetwarzania informacji procesami przebiegającymi w organizmach żywych np. za pomocą sztucznych sieci neuronowych, może pozwolić na rozwiązywanie problemów, których rozwiązanie za pomocą wyłącznie metod standardowych (w tym np. metodą elementów skończonych) jest trudne lub wręcz niemożliwe (np. problemy odwrotne). Zatem podjęcie przez Doktorantkę badań dotyczących możliwości wykorzystania zaawansowanych technik obliczeniowych, w tym sztucznych sieci neuronowych uznać należy za bardzo trafne. Tematyka badań jest ważna i aktualna. Tytuł rozprawy prawidłowo odzwierciedla jej treść.

Treść pracy przedstawiono na 134 stronach i podzielono na 8 rozdziałów.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawiła krótką charakterystykę podjętej problematyki, prawidłowo sformułowała szczegółowe cele rozprawy oraz podała jej zakres.

Rozdział drugi zawiera zwięzłe przedstawienie podstaw teorii sztucznych sieci neuronowych, ich projektowania i oceny błędów oraz metod wstępnego przygotowania danych. Z kolei w rozdziale trzecim Autorka omawia podstawy działania systemów

hybrydowych o różnym stopniu integracji, a w rozdziale czwartym opisuje model materiału Ramberga-Osgooda.

Rozdziały piąty, szósty i siódmy uznać należy za najważniejsze części rozprawy. Celem analiz przedstawionych w rozdziale piątym było badanie przydatności sieci neuronowych w identyfikacji parametrów modelu materiału Ramberga-Osgooda. Jest to problem odwrotny, a więc szczególnie trudny do analizy. Uzyskano bardzo dużą dokładność neuronowej identyfikacji parametrów materiału sprężysto-plastycznego. Tak małe błędy obliczeń neuronowych (np. praktycznie 100% wartości modułu Younga uzyskano z błędem względnym nie większym niż 1%) mogą wynikać z faktu, że wzorce utworzone zostały z danych wygenerowanych numerycznie (pseudo-doświadczalnych z symulacji testów indentacji). Można byłoby rozważyć wykorzystanie danych z obliczeń, ale z nałożonym szumem, który modeluje niedokładności rzeczywistych pomiarów. Docelowo wskazane byłyby dalsze badania, które pozwolą na weryfikację doświadczalną zaproponowanej metodologii i mogą dać odpowiedź na ile możliwe będzie zastosowanie jej w praktyce. W tym rozdziale warta uwagi jest interesująca propozycja Autorki dotycząca prostego sposobu redukcji rozmiaru wektora wejścia sieci neuronowej, a tym samym redukcji liczby parametrów sieci neuronowej.

Rozdział szósty dotyczy zastosowania sztucznych sieci neuronowych w połączeniu z metodą Monte Carlo do analizy niezawodności dwóch sprężysto-plastycznych, stalowych kratownic przestrzennych podatnych na utratę stateczności przez przeskok węzła. Rozważana była nieliniowość fizyczna, nieliniowość geometryczna oraz nieliniowość geometryczna i fizyczna. Istotne znaczenie praktyczne ma wniosek z obliczeń z użyciem autorskiego programu opartego na algorytmie hybrydowej metody Monte Carlo. Zgodnie z nim, takie podejście pozwala na zmniejszenie czasu obliczeń w stosunku do przypuszczalnego czasu obliczeń prowadzonych wyłącznie za pomocą metody elementów skończonych o wiele rzędów, a to dowodzi wymiernej efektywności algorytmu proponowanego przez Autorkę.

Kolejne zastosowanie sztucznych sieci neuronowych przedstawiono w rozdziale siódmym. Przygotowane w trybie *off line* neuronowe modele materiału zostały następnie włączone do programu metody elementów skończonych i wykorzystywane w analizie aluminiowych płaskich konstrukcji kratowych. Stosowanie sieci neuronowej jako modelu materiału nie powodowało obniżenia dokładności uzyskiwanych wyników analizy.

W ostatnim, ósmym rozdziale zamieszczono ogólne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i wskazano kierunki dalszych badań. Należy zgodzić się z Autorką co do kierunku dalszych badań w zakresie potrzeby weryfikacji zaproponowanych procedur z użyciem danych z badań eksperymentalnych.

Bibliografia liczy 179 pozycji. W tej liczbie jest 12 norm i 2 strony internetowe. Dwie prace zamieszczone w spisie literatury są współautorstwa Doktorantki. Liczba wykorzystanych źródeł jest zatem stosunkowo duża, a Autorka szeroko rozeznała prace innych autorów. Podkreślić należy, że spis literatury zamieszczony w opiniowanej pracy zawiera wiodące, w większości najnowsze prace zagraniczne i polskie.

Praca jest zredagowana bardzo starannie. Warto podkreślić, że treści przedstawiane są krótko, ale jasno, czytelnie i precyzyjnie.

Uważam, że do oryginalnych i najważniejszych efektów naukowych pracy należy zaliczyć:

- opracowanie autorskich algorytmów hybrydowych (sumujących możliwości metody elementów skończonych i sztucznych sieci neuronowych) do rozwiązywania kilku

ważnych problemów mechaniki materiałów i konstrukcji oraz sporządzenie własnych programów komputerowych wykorzystujących te algorytmy,

- wykazanie, że identyfikacja parametrów materiału typu Ramberga-Osgooda z użyciem techniki neuronowej, w przypadku procedury P-A i P-C, odbywa się ze zbliżoną dokładnością, co w odniesieniu do badań eksperymentalnych może pozwolić na znaczącą redukcję liczby testów,
- oryginalną propozycję kompresji danych wejściowych sieci neuronowej służącej do identyfikacji parametrów materiału z użyciem współczynników krzywych aproksymujących rzeczywiste krzywe indentacji albo krzywe opisujące kształt profilu odcisku; wydaje się, że z uwagi na prostotę, koncepcja ta może być konkurencyjna w stosunku do np. analizy składników głównych *PCA (Principal Component Analysis)*,
- dobór funkcji bazowych do aproksymacji poszczególnych gałęzi krzywych indentacji i gałęzi krzywych opisujących kształt profilu odcisku,
- skonstruowanie sieci neuronowej przeznaczonej do generowania próbek wykorzystywanych w probabilistycznej analizie niezawodności konstrukcji z użyciem metody Monte Carlo oraz zweryfikowanie i udowodnienie jej przydatności; warto podkreślić, że ten efekt badań Autorki ma również bardzo istotne znaczenie praktyczne.

3. Uwagi do rozprawy

3.1. Uwagi do dyskusji, pytania do Autorki

- Wszystkie obliczenia z użyciem sieci neuronowych prowadzone były z podziałem zbioru wzorców na zbiór uczący i testujący. Dlaczego Doktorantka nie wyodrębniła zbioru walidującego? Przecież zgromadzone zbiory wzorców we wszystkich analizowanych problemach były wystarczająco liczne. Poza tym wzorce były generowane numerycznie, więc tym bardziej nie byłoby problemu z ich liczbą.
- W sieciach neuronowych przygotowanych przez Doktorantkę do stosowania w przypadku problemów z rozdziału 5 oraz z rozdziału 6, przyjmowane były liniowe funkcje aktywacji w warstwie wyjściowej. Czy taki wybór był wyborem arbitralnym, czy może były próby obliczeń z wykorzystaniem innych funkcji, np. funkcji sigmoidalnej?
- Na stronie 23 pracy pada stwierdzenie, że „*Optymalne sformułowanie SN możliwe jest po spełnieniu nierówności: $LPS = L \cdot M$* ”, gdzie: *LPS* – liczba parametrów sieci, *L* – liczba wzorców uczących, *M* – liczba neuronów w warstwie wyjściowej (Uwaga: w rozprawie omyłkowo wstawiono znak „=” zamiast „≤”). Tymczasem w literaturze dotyczącej sieci neuronowych podawane są też inne praktyczne zalecenia, o czym zresztą Autorka wspomina w dalszej części pracy. Proszę o krótki komentarz.
- Kiedy skalowanie danych wejściowych/wyjściowych sieci neuronowej do przedziału [-0.9, 0.9] albo [0.1, 0.9] jest absolutnie niezbędne, a kiedy tylko zalecane?
- Jak w praktyce dobierane były wektory współczynników funkcji aproksymujących krzywe indentacji i wykresy profili odcisków z równania (5.1)? Jaka procedura została wykorzystana do doboru kombinacji funkcji bazowych w tych funkcjach aproksymujących?

3.2. Uwagi szczegółowe

- Nie bardzo mogę się zgodzić ze stwierdzeniem zamieszczonym na str. 27, ostatni akapit przed p. 2.4:

„Należy podkreślić, że żadna z przedstawionych miar błędu nie może być zastosowana dla wyników otrzymanych w różnych skalach (np. wyrażonych w różnych jednostkach). Są to tzw. bezwzględne miary błędu [94]”.

O ile w przypadku błędów MSE i $RMSE$ tak rzeczywiście jest, to błędy zdefiniowane wzorami (2.22) i (2.23) są błędami względnymi (zresztą sama Autorka tak je nazywa), a wzór (2.24) dotyczy współczynnika korelacji liniowej – zatem też nie jest to bezwzględna miara błędu.

- We wzorze (2.20) definiującym błąd średniokwadratowy MSE brakuje kwadratu.

$$\text{Jest: } MSE = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^M (t_i^{(p)} - y_i^{(p)})$$

$$\text{Powinno być: } MSE = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^M (t_i^{(p)} - y_i^{(p)})^2$$

- Na str. 18 (1-sza i 2-ga linia od góry) Autorka powołuje się na pracę „pod redakcją McClellanda i Rumelharta, por. [134]”. Tymczasem takiej pozycji literatury (David Rumelhart, James L. McClelland and the PDP Research Group: *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition*, MIT Press, 1986) w ogóle brakuje w bibliografii, a pod podawanym w bibliografii numerem [134] znajduje się norma.
- W pozycji literatury [91] omyłkowo podano tekst „*Generation of finite element mesh using neural networks*” zamiast właściwego źródła artykułu, tzn.: *Proceedings of the Fourth Bar-Ilan Symposium on Foundations of Artificial Intelligence*.
- Wydaje się, że dokładność wartości maksymalnych błędów względnych zamieszczonych w tabeli 4.1 (str. 48) wystarczyło ograniczyć do 2-giego miejsca po przecinku.
- Autorka analizuje rozkłady błędów względnych neuronowej identyfikacji parametrów materiału sprężysto-plastycznego (p. 5.4.4, rys. 5.7) łącznie w przypadku wszystkich wzorców, bez rozróżnienia zbioru uczącego i testującego. Wprawdzie błędy te są bardzo małe, ale z uwagi na ocenę właściwości generalizacyjnych proponowanych sieci neuronowych, interesujące byłoby rozkłady błędów względnych sporządzone osobno w zbiorze wzorców uczących i zbiorze wzorców testujących. Zresztą w przypadku kolejnych zagadnień prezentowanych w rozprawie, Autorka takie rozróżnienie konsekwentnie stosuje.
- Wzór (6.12) (str. 58) opisujący funkcję gęstości prawdopodobieństwa rozkładu log-normalnego obowiązuje dla x z przedziału: $0 < x \leq \infty$, a nie przedziału: $0 \leq x \leq \infty$, jak napisano w pracy.
- Zawartość tabeli 6.7 ze str. 85 jest wierną kopią zawartości tabeli 6.4 ze str. 81. Wystarczyło zatem zamieścić ją tylko raz, oczywiście z odpowiednim tytułem/komentarzem, w którym byłaby informacja o tym, że dotyczy zmiennych losowych wykorzystanych zarówno w modelu II – NF, jak i modelu III – NFG.

3.3. Uwagi redakcyjne

Podczas lektury ocenianej pracy dostrzegłam drobne niedociągnięcia natury redakcyjnej. Trzeba do nich zaliczyć:

- Na str. 10 brakuje wyjaśnienia skrótu UM (układ mechaniczny). Dobrze byłoby również uzupełnić wykaz ze str. 15 o takie wyjaśnienie.
- Na str. 12 w 3-ciej linii od dołu należałoby zastąpić kropkę przecinkiem i dodać kropkę na końcu ostatniej linii.

- W pozycji literatury [167] na str. 129 dwukrotnie występuje skrót "in:", a wystarczy tylko raz.
- Na str. 29, p. 2.4.3, 1-szy akapit, 8-ma linia, jest: "... tzw. nadmiernego dopasowanie ...", a powinno być: "... tzw. nadmiernego dopasowania ...".
- str. 31, 6-ta linia od dołu
Chyba chodziło raczej o redukcję „słabych stron jednej techniki przez dodatkowe zastosowanie innej techniki”, a nie o „wzmocnienie słabych stron jednej techniki ...”
- W tytule tabeli 3.1 (str. 32) warto byłoby odwołać się dodatkowo do pozycji literatury [118]. Analogiczna uwaga dotyczy tytułu tabeli 3.2 (str. 33).
- Wydaje się, że na str. 42, w opisie procedury P-A identyfikacji parametrów materiału, Autorka dokonała zbyt dużego „skrótów myślowego” pisząc: „Krzywe te przekazywane są do komputera i na ich podstawie wykonywana jest identyfikacja parametrów.” Warto byłoby uzupełnić nieco ten fragment wskazując, że w tym celu wykorzystuje się odpowiednie oprogramowanie.
- str. 47, 48
Gdyby konsekwentnie „trzymać się” zasad numeracji, to tabela o numerze 4.1 powinna być tabelą 5.1.
- W przedostatniej linii 1-szego akapitu p. 6.4 (str. 60) brakuje „w” przed „Inżynierii Lądowej”.
- str. 70, ostatnia linia
Jest „por. rys. 6.11”, a powinno być „por. rys. 6.12”.
- str. 77, 2-gi akapit od dołu, 3-cia linia
Zamiast „w tabeli 5.3”, powinno być „w tabeli 6.3”.
- str. 98, p. 7.3, 2-ga linia od dołu
Napisano, że „... Związek ten, opisany w rozdziale 3, ...”. Tymczasem opis ten zamieszczono w rozdziale 4.
- str. 103, ostatnia linia
Jest odwołanie do p. 6.3.1, a powinno być do p. 7.3.1.
- str. 109, rys. 7.9
Przekrój A_4 to najprawdopodobniej L 100x100x10, a nie, jak podano, L 100x1000x10.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Beaty Potrzeszcz-Sut przedstawia oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego dotyczącego hybrydowego wykorzystania zaawansowanych technik obliczeniowych (w szczególności sztucznych sieci neuronowych i metody elementów skończonych) w wybranych zagadnieniach mechaniki materiałów i konstrukcji. Autorka swobodnie porusza się w obszarze wiedzy z zakresu nieliniowej mechaniki konstrukcji budowlanych, probabilistycznych metod analizy niezawodności konstrukcji, modelowania materiałów, nowoczesnych tzw. „twardych” i „miękkich” metod obliczeniowych. Wykazała się umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz biegłością w wykonywaniu złożonych analiz numerycznych. Warto zauważyć, że zakres przeprowadzonych przez Autorkę badań jest bardzo szeroki i zaawansowany naukowo, a rozprawa przedstawia wiele wartościowych analiz i wniosków. Wyniki badań Doktorantki są istotne zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego w obszarze materiałów i konstrukcji budowlanych. Założone przez Autorkę cele pracy zostały osiągnięte. Kwestie dyskusyjne i nieliczne, drobne uchybienia nie podważają bardzo wysokiej oceny rozprawy.

Zdecydowanie stwierdzam, że przygotowana przez mgr inż. Beatę Potrzeszcz-Sut rozprawa doktorska pt.: „*Sieci neuronowe w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji i materiałów*” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003r. (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Beaty Potrzeszcz-Sut do publicznej obrony rozprawy.

Ponadto, z uwagi na bardzo wysoki poziom naukowy przedłożonej rozprawy, wnoszę o jej wyróżnienie.

Krzysztof Kuciński