Prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak
Instytut Energetyki Cieplnej
Politechnika Poznańska

Poznań, 9.12 2022

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Rafała Kieszka

pt.: „WYKORZYSTANIE ALGORYTMU OPARTEGO NA SZTUCZNYCH SIECIACH NEURONOWYCH DO OPTYMALIZACJI ELEMENTÓW WIRUJĄCYCH SILNIKA TURBINOWEGO"

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Rafała Kieszka stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna" Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie nr 53/RDN IM/2022 z dnia 28 września 2022r.

Praca zawiera 179 stron i podzielona jest na 10 rozdziałów, w tym 4 nieponumerowane, poprzedzonych spisem treści, wykazem symboli oznaczeń, a zakończona bibliografią liczącą 120 pozycji literaturowych, 17 załącznikami, spisem tabel oraz spisem rysunków i wykresów. Brakuje streszczenia pracy w języku polskim i angielskim.

1. Omówienie pracy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Kieszka jest opracowanie algorytmu opartego na sztucznych sieciach neuronowych do optymalizacji wybranych elementów lotniczego turbinowego silnika odrzutowego. Ze spisu literatury wynika, że Doktorant jest współautorem 3 prac cytowanych w rozprawie.

We wstępie do rozprawy Doktorant przedstawia w ogólnym zarysie ideę algorytmów genetycznych opartych na naturalnych procesach rozmnażania organizmów żywych jak krzyżowanie i mutacja. Wskazuje na stochastyczny charakter tych algorytmów, ich różnorodność oraz możliwość łączenia z innymi metodami optymalizacji, wśród których wyróżnia sztuczne sieci neuronowe. Dalszą część wstępu poświęca przedstawieniu idei takiej sieci oraz zastosowaniu sieci neuronowych w zagadnieniach związanych z lotnictwem. Z tej analizy wynika postawiony przez Doktoranta cel jakim jest opracowanie algorytmu opartego o sztuczne sieci neuronowe do optymalizacji wybranych elementów lotniczego turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego w celu optymalizacji zespołu sprężarkowego.

W rozdziale 1 zawarta została analiza stanu wiedzy dotyczącej badań napędów lotniczych i zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania zagadnień z tej dziedziny. Autor wskazuje na zagadnienia projektowania i optymalizacji oraz diagnozowania i detekcji usterek. Szeroko opisane jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w lotnictwie. Przedstawione są między innymi wyniki prac badawczych dotyczących modelowania i lądowania samolotów Boeing, wspomagania zarządzania remontami silników lotniczych, łączenia zdjęć lotniczych wykonywanych w trakcie lotu samolotu oraz sterowania obiektami latający-

mi. W dalszej części rozdziału swoją analizę zawęża do zastosowania sztucznych sieci neuronowych w maszynach przepływowych z podziałem na projektowanie i optymalizację oraz sterowanie i diagnozowanie. W ramach tej analizy przedstawia wyniki prac dotyczących optymalizacji kształtu łopatek, kształtu kanału przepływowego silnika, czy też masy tarczy sprężarki. W części dotyczącej diagnozowania i sterowania, omawia prace, w których sieci neuronowe zostały użyte do diagnozowania silników lotniczych oraz symulowania stanów i sterowania statkiem powietrznym lub silnikiem turbinowym.

Z tej analizy wynika postawiona przez Doktoranta teza: „Połączenie metody elementów skończonych i algorytmów opartych o sztuczne sieci neuronowe pozwoli stworzyć efektywny pod względem czasu obliczeń program do analizy wytrzymałościowej elementów zespołów wirnikowych".

Informacje zawarte w rozdziale pozwalają stwierdzić, że tematyka badań wpisuje się w aktualny trend badań związany z rozwiązywaniem zagadnień technicznych (inżynierii lotniczej) w oparciu o algorytmy genetyczne połączone ze sztucznymi sieciami neuronowymi. Wskazany jest również obszar badań, gdzie nie stosowano sztucznych sieci neuronowych. Dotyczy to obliczeń wytrzymałościowych elementów maszyn wirnikowych, co Doktorant uwzględnił w tezie rozprawy.

Rozdział 2 zawiera opis algorytmów sztucznej inteligencji, które zostały przez niego wykorzystane do obliczeń przedstawionych w dalszej części pracy. Jako pierwsze omawia algorytmy genetyczne, wyjaśniając zasady działania tego typu algorytmów. Kolejną grupę algorytmów stanowią algorytmy oparte na sztucznych sieciach neuronowych. Sieci te są obiektami matematycznymi naśladującymi biologiczne komórki nerwowe – neurony. W modelu matematycznym wejściom do komórki (synapsom), przypisuje się odpowiednie współczynniki liczbowe (wagi), które mogą działać pobudzająco lub tłumić działania poszczególnych komórek. Podany jest podział sztucznych sieci neuronowych na jednokierunkowe oraz rekurencyjne – ze sprzężeniem zwrotnym. Kolejny podrozdział poświęcony jest regułom uczenia sztucznych sieci neuronowych. Metody te podzielone są na dwie grupy: z nauczycielem oraz bez nauczyciela. Opisanych jest 8 metod uczenia sztucznych sieci neuronowych, z których do obliczeń przedstawionych w rozdziałach 5 i 6 Doktorant stosował metodę gradientów sprzężonych z regulacją, metodę momentum oraz algorytm RPROP. W dalszej części rozdziału Doktorant podejmuje próbę udowodnienia, że zastosowanie algorytmu opartego na sieci neuronowej jest możliwe, a otrzymane rozwiązania są poprawne fizycznie. Przykłady w tej części pracy zostały tak dobrane, aby problemy rozwiązywane za pomocą sztucznej sieci neuronowej miały analityczne rozwiązanie, a w 3-im przykładzie zamiast rozwiązania analitycznego, uwzględniono rozwiązanie MES. Do tych problemów należy wyznaczenie naprężeń: dla belki wysięgnikowej, dla tarczy prostej oraz tarczy profilowanej sprężarki osiowej. W procesie uczenia sieci wykorzystano metodę gradientów sprzężonych. Obliczenia zostały wykonane w środowisku MATLAB i na podstawie przedstawionych w tym rozdziale wyników, można stwierdzić, że algorytm prawidłowo wyznacza naprężenia dla wybranych przykładów.

Rozdział jest interesujący, w sposób jasny i uporządkowany wprowadza do zagadnień, które będą kontynuowane w dalszej części pracy.

Rozdział 3 rozpoczyna prezentację wyników obliczeń numerycznych dotyczącą zastosowania sztucznych sieci neuronowych do obliczeń wytrzymałościowych elementów maszyn wirnikowych, a więc bezpośrednio związanych z wykazaniem tezy oraz realizacją celu pracy. Algorytm przedstawiony przez Doktoranta w tym rozdziale jest połączeniem metody elementów skończonych, uczenia maszynowego za pomocą sztucznych sieci neuronowych oraz algorytmu genetycznego. Na podstawie danych wejściowych wykonywane są obliczenia numeryczne w oparciu o algorytm MES, które posłużą do uczenia sztucznej sieci neuronowej. Wybrana została sieć typu Feed Forward, dla której sprawdzono skuteczność działania 9 algorytmów uczących. Badana była efektywność sieci dla 2 do 5 warstw ukrytych oraz różnych wartości liczby neuronów, aby wykluczyć warianty sieci uczące się na pamięć. Na podstawie przeprowadzonych badań wybrana została sieć neuronowa zbudowana z 4 warstw ukrytych po 50 neuronów w każdej i jednej warstwy wyjściowej. Pojedyńczy neuron posiada bias i sigmoidalną funkcję aktywacyjną. Jako algorytm uczący zastosowano algorytm skalowalnych gradientów sprzężonych (SCG – Scaled Conjugate Gradient Method). Kolejnym krokiem algorytmu była optymalizacja kształtu tarczy za pomocą algorytmu genetycznego z zastosowaniem strategii elitarnej, polegającej na usuwaniu wszystkich rozwiązań za wyjątkiem najlepszego po każdej iteracji algorytmu genetycznego. Wybór tej strategii znacząco zmniejsza czas i liczbę iteracji algorytmu genetycznego niezbędnych do osiągnięcia minimum funkcji celu. Funkcją celu w tym zagadnieniu była masa tarczy sprężarki. Autor stosował również funkcję kary w przypadku przekroczenia naprężeń dopuszczalnych. W dalszej kolejności, dla optymalnej konstrukcji obliczane są naprężenia dopuszczalne za pomocą MES i jeśli wyniki obliczeń uzyskane za pomocą SSN są porównywalne z założoną dokładnością to algorytm kończy swoje działanie. W dalszej części rozdziału przedstawione zostały wyniki obliczeń z zastosowaniem tego algorytmu oraz porównano czas pracy tego algorytmu z algorytmem wzorcowym, w którym obliczenia z użyciem SSN zastąpiono algorytmem MES.

Rozdział napisany zbyt syntetycznie. W domyśle duża liczba obliczeń, które nie zostały pokazane, a tylko lakonicznie o nich wspomniano.

W rozdziale 4, 5 i 6 w oparciu o algorytm opisany w rozdziale 3 przedstawiono optymalizację konstrukcji wirnika tarczowo-bębnowego sprężarki turbinowego silnika lotniczego AŁ-21F-3. Rozdział 4 dotyczy sposobu wyznaczania funkcji celu określonej jak poprzednio jako masę tarczy oraz funkcji kary dołączonej do funkcji celu, kiedy naprężenia wyznaczone przez SSN przekraczają naprężenia dopuszczalne. Pokazano również zastosowanie języka APDL do wyznaczania naprężeń wzdłuż wybranych ścieżek konstrukcji tarczowo-bębnowej.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań związane z doborem optymalnej metody uczenia SSN oraz jej architektury. Do uczenia wybrano 3 metody: metodę gradientów sprzężonych z regulacją, metodę momentum i algorytm RPROP. Dane do uczenia SSN zostały wygenerowane w oparciu o program napisany w języku APDL. Otrzymane wyniki nie wykazały wyższości żadnego z tych algorytmów. W dalszej części rozdziału przedstawione zostały wyniki optymalizacji struktury sieci. Badano sieci zawierające od 1 do 3 warstw ukrytych i od 1 do 50 neuronów w każdej warstwie oraz wpływ rozpiętości bazy uczącej w zakresie ±5%, ±10%, co pozwoliło otrzymać zbiór rozwiązań optymalnych w ujęciu Pareto. Ostateczne wyniki badań wskazały na sieć typu Feed Forward (20-2-1) uczoną metodą gradientów sprzężonych o rozpiętości danych uczących ±5%.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki optymalizacji elementów 14-stopniowej sprężarki silnika AŁ 21F-3 uzyskanych za pomocą algorytmu genetycznego i sztucznych sieci neuronowych. Otrzymane wyniki charakteryzują się dużą dokładnością co potwierdza cel postawiony przez Doktoranta w swojej pracy

Kończą pracę rozdziały nie posiadające kolejnych numerów, tj. „Wnioski końcowe", „Elementy nowości" oraz „Kierunki dalszych prac."

Na szczególną uwagę zasługują oryginalne osiągnięcia Doktoranta, do których można zaliczyć:

- wykazanie, że sztuczne sieci neuronowe są skutecznym narzędziem do rozwiązywania zagadnień optymalizacji konstrukcji technicznych na przykładzie konstrukcji wirnika tarczowo – bębnowego sprężarki turbinowego silnika lotniczego.
- modyfikacji algorytmu genetycznego, polegającej na wprowadzeniu zmiennej chwilowej przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych w każdej iteracji. Pozwala to skrócić czas działania algorytmu oraz przeprowadzać optymalizację dla mniejszych populacji.

2. Uwagi

1. Praca napisana jest poprawnym językiem polskim, jednak zdanie, w którym we wstępie do pracy Doktorant definiuje jej cel brzmi nieco dziwnie: „Celem pracy było opracowanie algorytmu opartego na SSN do optymalizacji wybranych elementów lotniczego turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego w celu optymalizacji zespołu sprężarkowego." W zdaniu powtarzają się słowa „cel", „optymalizacja" oraz zamiennie „SSN" i „algorytmy uczenia maszynowego". Cel pracy w najprostszej wersji mógłby brzmieć następująco: „Celem pracy było opracowanie algorytmu opartego o Sztuczne Sieci Neuronowe do optymalizacji zespołu sprężarkowego lotniczego turbinowego silnika odrzutowego." Poza tym w pracy Autor konsekwentnie używa słowa ilość w celu określenia policzalnych wielkości: np. ilość warstw, ilość iteracji, ilość neuronów, itp. Powinien zamiast słowa „ilość", stosować słowo „liczba".

2. Wzór (2.5) na str. 41 bardziej pasuje do reguły Widrowa-Hoffa i umożliwia skorygowanie błędu pomiędzy aktualną i oczekiwaną odpowiedzią. Reguła uczenia Delta obowiązuje dla neuronów z ciągłymi funkcjami aktywacji i nadzorowanego trybu uczenia. Wyznaczona waga wynika z minimalizacji błędu średniokwadratowego i dla funkcji sigmoidalnej jest dana wzorem

$$W^{(j+1)} = W^{(j)} + \eta^{(j)}\left(1 - Y^{(j)}\right)Y^{(j)}\delta^{(j)}X^{(j)}$$

3. Jaka jest relacja pomiędzy kierunkami poszukiwań $\pi^{(j)}$ i $p^{(j)}$ w algorytmie największego spadku, str. 42?

4. W tabeli 2.1 dopuszczalny przedział dla prędkości kątowej i ciągnienia mieści się w przedziale od 0 do 10^4, natomiast na str. 52 podane jest odpowiednio $<0, 10^5>$ i $<0, 10^{10}>$. Które zakresy są prawidłowe?

5. Brak informacji dotyczących szczegółów obliczeń metodą elementów skończonych, tzn. nie jest pokazana siatka elementów skończonych, brak informacji związanych z jakością tej

siatki. Jest to o tyle ważne, że aby nauczyć sieć prawidłowo działać, trzeba za pomocą MES wyznaczyć określoną liczbę rozwiązań. Popełnienie błędu na tym etapie ma znamiona błędu systematycznego, którego sieć neuronowa nie zauważy. Co prawda w rozdziale 2 Autor pisze o porównaniu wyników obliczeń numerycznych z analitycznymi, ale nie w każdym z rozwiązywanych problemów znane jest rozwiązanie analityczne.

6. Rozdział 3 jest bardzo syntetycznie opisany, a przez to trudny do zrozumienia. O ile zrozumiała jest koncepcja algorytmu, o tyle informacje szczegółowe nie pozwalają prawidłowo ocenić jego działania np.

* na str. 62 fragment tekstu: „Początkowo tarczę podzielono na 10 równych elementów skończonych. Następnie pierwsze dwa elementy podzielono na cztery, a ostatnie dwa na dwa, co w efekcie pozwoliło otrzymać tarczę podzieloną na 18 elementów skończonych z zagęszczeniem siatki w okolicy krawędzi, zgodnie z regułą (3.1)". Ten tekst byłby bardziej zrozumiały, gdyby ilustrował go rysunek. O ile pierwsza część jest zrozumiała, o tyle od sformułowania „z zagęszczeniem ..." już tak nie jest.

* jak wygląda u Doktoranta algorytm oparty o MES?

* co to jest kwadratowe równanie Taylora?

* sformułowanie „modyfikacja algorytmu genetycznego" sugeruje wkład Doktoranta w rozwój metody, jednak to sformułowanie nie odzwierciedla sensu tego co zostało zrobione. Strategia elitarna jest jedną z możliwości algorytmu genetycznego i nie można jej uznać za modyfikację – jest integralną składową algorytmu genetycznego. Brak informacji dotyczących algorytmu genetycznego zastosowanego do obliczeń prezentowanych w tym rozdziale.

* tytuł rozdziału zaczyna się od słowa metamodel, ale w rozdziale nie ma nawiązania do tego tytułu. Co w takim razie oznacza to sformułowanie?

* brak opisu MES, a tylko krótkie informacje jak np. „Różnica naprężeń algorytmu MES (uproszczonego poprzez pominięcie macierzy sztywności dodatkowej) dla tarczy po optymalizacji nie przekracza 0.5%". Gdzie jest prezentacja wyników obliczeń? Co to jest macierz sztywności dodatkowej? Brakuje przynajmniej równania macierzowego, które jest rozwiązywane metodą elementów skończonych, z którego można by wywnioskować czy różnica 0.5% nie jest przypadkiem, gdzie uczenie maszynowe popełnia błąd systematyczny i stąd takie dopasowanie. Ryzyko uproszczeń w przypadku uczenia maszynowego jest duże.

* dopiero wyniki pokazane na rys. 3.5 dają pewność, że proces optymalizacji zastosowany przez Doktoranta jest poprawny. Jednak droga do tego celu opisana w pracy jest niejasna.

7. W rozdziale 4 użyto analitycznych wzorów do obliczenia masy badanego elementu. Związany z tym jest duży nakład pracy, którego nie można przenieść automatycznie na inne badane kształty. Dlaczego Doktorant nie wykorzystał siatki elementów skończonych do obliczenia objętości rozważanej geometrii?

8. Optymalizacja czasu obliczeń wydaje się niekompletna, ograniczona do określonego sprzętu komputerowego, na którym Doktorant wykonywał obliczenia, a którego specyfikacji w pracy nie ma. Analiza nie uwzględnia zagadnień związanych z równoległym prowadzeniem obliczeń wg proponowanego przez Autora algorytmu, co w istotny sposób może wpłynąć na

czasy poszczególnych kroków, a także na sensowność zastosowania algorytmów opartych o sieci neuronowe.

9. Na str. 72, zdanie: „Sztuczne sieci neuronowe zostały wykorzystane w celu zmniejszenia czasu określenia funkcji kary". Należało by to lepiej wyjaśnić. Czy tutaj chodzi o porównanie czasu obliczeń z algorytmem wzorcowym, opisanym w rozdziale 3?

10. Nie ma większego sensu załączanie programów, napisanych przez Doktoranta, szczególnie jeśli spojrzy się na strony od 113 do 123. Można przedstawić schemat blokowy napisanego przez siebie programu, albo formularz dotyczący wprowadzania do obliczeń danych wejściowych, ale to zostało zrobione w pracy. Może zamiast dołączać program do pracy, można lepiej opisać jego działanie w pracy.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy.

3. Podsumowanie

Praca mgr inż. Rafała Kieszka potwierdziła słuszność postawionej przez niego tezy. Cele jakie sobie postawił dla potwierdzenia tezy, zostały przez niego w pełni zrealizowane i stanowią Jego oryginalne osiągnięcie.

Doktorant wykazał się umiejętnościami poprawnego formułowania problemów badawczych, prowadzenia obliczeń numerycznych oraz ich weryfikacji.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Kieszka spełnia wymogi określone w art. 13 Ustawy z dnia 14.03.2003r o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i świadczy o dobrej ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Andrzej Frąckowiak