

Częstochowa, 04.09.2023

dr hab. inż. Dawid Cekus, prof. PCz
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 69
42-201 Częstochowa

OPINIA

**o rozprawie doktorskiej mgra inż. Grzegorza Spyry
pt. „Metody inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach projektowania i optymalizacji
wybranych elementów konstrukcyjnych zabudów samochodów ciężarowych”**

Promotor pracy: dr hab. inż. Witold Beluch, prof. PŚ

Podstawa formalna wykonania opinii:

- pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej
prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 12.07.2023 r., sygnowane RDIME.512.19.2023.

1. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Spyry pt. „*Metody inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach projektowania i optymalizacji wybranych elementów konstrukcyjnych zabudów samochodów ciężarowych*” została udokumentowana na 137 stronach maszynopisu formatu A4. Praca została podzielona na osiem rozdziałów poprzedzonych spisem treści, a zakończona streszczeniem w języku polskim i angielskim. Literaturę oraz wykaz zastosowanego w pracy oprogramowania umieszczono w ostatnim ósmym rozdziale dysertacji. Bibliografia obejmuje 139 pozycji, w tym odniesienia do artykułów naukowych, książek i monografii, źródeł internetowych, dokumentacji technicznych, dokumentacji oprogramowania, norm i dyrektyw. Praca zawiera 90 rysunków i 15 tabel.

Pierwszym rozdziałem pracy jest „Wstęp”, który został podzielony na dwa podrozdziały. Pierwszy podrozdział zawiera przegląd zawartości rozprawy, a drugi to cel i teza pracy.

Rozdziały od drugiego do czwartego zapoznają czytelnika z zagadnieniami i narzędziami wykorzystanymi podczas realizacji praktycznej części rozprawy.

Drugi rozdział dotyczy zagadnień optymalnego projektowania konstrukcji mechanicznych. Zawarto w nim podstawowe informacje dotyczące zasad i norm stawianych konstruktorom, programów do komputerowego wspomaganie pracy inżyniera, materiałów

Biuro Dzielana

konstrukcyjnych i wpływu technologii spawania elementów stalowych na właściwości wytrzymałościowe stali, bezpieczeństwa konstrukcji, zagadnień optymalizacyjnych, w tym optymalizacji konstrukcji jako części koncepcji Przemysłu 4.0 oraz projektowania zabudów na samochody ciężarowe. W podrozdziałach dotyczących optymalizacji wyjaśniono, co to są metody gradientowe, bezgradientowe, optymalizacja wielokryterialna i topologiczna. W przypadku fragmentów odnoszących się do procesu projektowania zabudów na samochody ciężarowe zamieszczono aspekty związane z: wytycznymi producentów podwozi samochodowych dla firm produkujących tego typu konstrukcje; dostępnym oprogramowaniem do projektowania zabudów; obliczaniem dopuszczalnych nacisków na poszczególne osie pojazdu i parametrów/wymiarów pojazdu; obciążeniami żurawi przeładunkowych w czasie pracy; statecznością pojazdu z żurawiem oraz sił działających na samochód w ruchu.

W rozdziale trzecim przedstawiono kwestie związane z metodą elementów skończonych, w tym podstawy MES, dyskretyzację modeli, tworzenie globalnej macierzy sztywności, elementów jednowymiarowych typu Multi-Point Constraint (MPC), definiowania kontaktu pomiędzy elementami modelu, hipotez wyężeniowych, oprogramowania wykorzystującego MES w obliczeniach mechanicznych oraz weryfikacji eksperymentalnej.

Informacje dotyczące zasad działania algorytmów ewolucyjnych i sztucznych sieci neuronowych oraz ich wykorzystania w zagadnieniach optymalizacyjnych konstrukcji zawarto w rozdziale czwartym.

Kluczowymi rozdziałami pracy są rozdziały piąty i szósty.

W rozdziale piątym omówiono wypracowaną metodologię optymalnego projektowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji ram pomocniczych zabudów samochodów ciężarowych, do których dodatkowo montowany jest odpowiedni żuraw hydrauliczny. Szczegółowo omówiono algorytm działania napisanego programu komputerowego, począwszy od utworzenia listy zmiennych parametrów podlegających optymalizacji oraz ustalenia zakresów dopuszczalnych wartości dla poszczególnych zmiennych, poprzez generowanie modelu konstrukcji (który zawiera wszystkie informacje o siatce elementów skończonych, materiałach, warunkach brzegowych oraz kontaktach pomiędzy odpowiednimi regionami), definiowanie funkcji celu, działanie algorytmu ewolucyjnego zaimplementowanego w programie DPEA, kończąc na automatycznym odczycie wyników analizy numerycznej. Ponadto zaproponowano rozwinięcie opracowanej metodologii poprzez zastosowanie sztucznych sieci neuronowych.

Przykłady zastosowania opracowanej metodologii zilustrowano w rozdziale szóstym. Wykonano optymalizację jednokryterialną zabudowy skrzyniowej z żurawiem zamontowanym

na tylnym zwisie pojazdu, optymalizację wielokryterialną zabudowy wywrotki trójstronnej z żurawiem zamontowanym za kabiną pojazdu oraz optymalizację wielokryterialną samego ramienia teleskopowego żurawia.

Podsumowanie, wnioski oraz kierunki dalszego rozwoju zawarto w rozdziale siódmym. Wskazano najważniejsze osiągnięcia, których dokonano w ramach niniejszej rozprawy, uzasadniono prawidłowość prezentowanej metodologii, a także potwierdzono realizację celu pracy oraz tezy, którą postawiono na początku dysertacji.

2. Analiza i ocena rozprawy

Rozważane w opiniowanej dysertacji zagadnienie naukowe to szeroko rozumiana optymalizacja elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz metod sztucznej inteligencji. Wybór tematyki uważam za w pełni uzasadniony, a rozpatrywaną problematykę za aktualną zwłaszcza w kontekście zastosowania metod inteligencji obliczeniowej w mechanice.

Cel i zakres pracy zostały poprawnie zdefiniowane oraz stanowią swoistą całość. Teza pracy, która brzmi: *„Zastosowanie parametrycznego, modułowego modelu konstrukcji o zmiennej topologii z wykorzystaniem algorytmów optymalizacji globalnej oraz obliczeń MES pozwala na skuteczną optymalizację układów mechanicznych”* została sformułowana prawidłowo, chociaż można postawić pytanie: *Czy algorytmy optymalizacji globalnej w połączeniu z MES mogłyby kiedykolwiek być nieefektywne podczas optymalizacji układów mechanicznych?* W mojej ocenie wątpliwości budzą rozdziały od drugiego do czwartego, które zawierają wprowadzenie teoretyczne bardziej odpowiednie dla prac licencjackich, inżynierskich lub magisterskich. Szczególnie zawartość rozdziału trzeciego pt. *Metoda elementów skończonych w analizie konstrukcji* (poza 3.4. *Elementy MPC*) oraz rozdziału czwartego pt. *Metody inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach optymalizacji* wydaje się zbędna. W przypadku rozdziału 3, umieszczenie informacji teoretycznych dotyczących MES, której podstawy zostały dość dokładnie sformułowane pod koniec lat 50-tych XX wieku, jest nieuzasadnione. Podobnie zbyteczne wydaje się opisywanie w rozdziale 4 sztucznych sieci neuronowych, które nie zostały wdrożone w części praktycznej pracy, a jedynie zaproponowano koncepcję zaimplementowania sztucznych sieci neuronowych w opracowanej metodologii. W miejsce tych rozdziałów (lub ich fragmentów) z korzyścią byłoby zamieszczenie „klasycznego” przeglądu literatury, którego nie ma w rozprawie. Może to wynikać w pewnym stopniu z przyjętej tematyki pracy, jednak nawet, jeżeli brakuje tego typu rozwiązań na rynku, to Autor mógł pokusić się chociaż o wskazanie publikacji, które dotyczą

np. zastosowania MES i/lub optymalizacji do projektowania dowolnych konstrukcji mechanicznych.

Aplikacyjna część pracy nie budzi zastrzeżeń. Można stwierdzić, że Doktorant wykonując kolejne zadania cząstkowe konsekwentnie zmierzał do postawionego celu. Zrealizował to poprawnie metodologicznie, rozpoczynając od przygotowania zestawu parametrycznych modułów modelu konstrukcji, opracowania generatora modelu oraz jego dostosowania do tworzenia modeli ram pomocniczych zabudów samochodów ciężarowych oraz belek teleskopowych, wygenerowania modelu do obliczeń konstrukcji metodą elementów skończonych, kończąc na przeprowadzeniu optymalizacji wybranych konstrukcji z uwagi na wybrane kryteria z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Zagadnienia te zostały ze sobą powiązane za pomocą opracowanego programu komputerowego umożliwiającego prowadzenie obliczeń równoległe na kilku rdzeniach procesora napisanego w języku C++ z wykorzystaniem polimorfizmu. Aplikacja umożliwia pracę w trzech trybach: trybie optymalizacji (na podstawie danych wejściowych zdefiniowanych przez użytkownika przygotowuje odpowiednie pliki związane z działaniem algorytmu ewolucyjnego i rozpoczyna proces optymalizacji), trybie obliczania pojedynczej konstrukcji (stosowanym przy sprawdzaniu przez konstruktora modelu po edycji dobranych podzespołów konstrukcji), oraz trybie generowania danych na potrzeby przyszłego uczenia sztucznych sieci neuronowych. Część problemów jest rozwiązywana za pomocą już istniejących programów zewnętrznych: Gmsh (tworzenie siatki elementów skończonych), NX Nastran (prowadzenie analiz metodą elementów skończonych), DPEA (optymalizacja modelu za pomocą algorytmu ewolucyjnego), Femap (postprocesor), MySQL (komunikacja z zewnętrzną bazą danych), które jednak oddzielnie nie są w stanie zoptymalizować modeli o znacznej zmienności topologii konstrukcji, a jedynie rozwiązywać klasyczne modele parametryczne. Niemniej umiejętność programowania przez Doktoranta mogły skłonić go do napisania własnych funkcji optymalizacyjnych wykorzystujących algorytmy ewolucyjne, zamiast korzystać z dostępnego oprogramowania, co pozwoliłoby w przyszłości rozwijać procedury optymalizacyjne.

Docelowym elementem pracy było przeprowadzenie badań numerycznych weryfikujących działanie opracowanego programu komputerowego i zaproponowanej metodologii. Wykonano trzy przykładowe optymalizacje powiązane z pracą zawodową Doktoranta. W pierwszym przypadku optymalizacja jednokryterialna miała na celu sprawdzenie, o ile masa ramy pomocniczej zabudowy skrzyniowej otwartej wraz z zamontowanym żurawiem na tylnym zwisie pojazdu mogłaby być mniejsza od masy już istniejącej konstrukcji. Program uwzględniał osiem przypadków ułożenia ramienia żurawia

oraz dwa przypadki wynikające z sił działających na pojazd (wzdłuż osi podłużnej pojazdu oraz sił bocznych) w trakcie poruszania się. Drugim zadaniem była optymalizacja wielokryterialna (minimalizacja masy i kosztów materiału – przy wagach równych 0,5) ramy pomocniczej zabudowy wywrotki trójstronnej z żurawiem zamontowanym za kabiną pojazdu. Rozpatrywano 19 różnych konfiguracji warunków brzegowych (osiem położenia ramienia żurawia w przypadku pojazdu załadowanego oraz niezaładowanego, dwa przypadki ruchu pojazdu z pełnym ładunkiem, jeden przypadek z podniesioną skrzynią ładunkową do tyłu). Ostatni przykład dotyczył optymalizacji wielokryterialnej ramienia teleskopowego żurawia (dla którego opracowano osobną klasę w programie, zawierającą opis tego typu konstrukcji) dedykowanego dla mobilnych stacji diagnostycznych. Ustalono wagi kryteriów na 0,75 dla kryterium minimalizacji masy oraz 0,25 dla kryterium minimalizacji kosztów. Otrzymane z przeprowadzonych analiz wyniki udowadniają skuteczność utworzonego oprogramowania/metodologii. W dwóch pierwszych przypadkach uzyskano masy modeli mniejsze od istniejących konstrukcji odpowiednio o 37,6% i 18%. Natomiast zoptymalizowany żuraw przeładunkowy był lżejszy o ok. 46% od wersji koncepcyjnej, dlatego projekt zoptymalizowanej struktury posłużył za punkt wyjścia do zaprojektowania rzeczywistej konstrukcji żurawia przeładunkowego. Ponadto wykazano uniwersalność opracowanej metodologii poprzez możliwość projektowania wybranych elementów konstrukcyjnych zabudów indywidualnie dopasowanych do potrzeb konkretnego użytkownika dla dowolnych samochodów ciężarowych z uwzględnieniem montażu dedykowanych żurawi. Opracowane oprogramowanie ma charakter otwarty i może być rozbudowywane o kolejne podzespoły, typy konstrukcji (poprzez tworzenie odpowiednich klas, jak miało to miejsce w przykładzie trzecim) oraz o nowe funkcjonalności.

Konkludując, mogę stwierdzić, że przedstawiona metodologia i przygotowane oprogramowanie stanowią oryginalne rozwiązanie Autora w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej w obszarze mechanika (obecnie inżynieria mechaniczna), jednocześnie uważam, że niniejsza praca jest na pograniczu mechaniki i informatyki. Postawione i zrealizowane zgodnie ze sformułowanym celem zadania, ściśle powiązane z aktywnością zawodową Doktoranta, mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i użyteczne. Ich wykonanie wymagało od Opiniowanego umiejętności operowania warsztatem naukowym oraz swobodnym poruszaniem się w obszarze tematycznym związanym z projektowaniem konstrukcji, optymalizacją, metodą elementów skończonych wraz z oprogramowaniem bazującym na tej metodzie, algorytmami ewolucyjnymi oraz programowaniem orientowanym obiektowo. Doktorant wykazał się trafnością postępowania

badawczego i poprawnością wnioskowania, co świadczy o dużej intuicji, dociekliwości, wiedzy i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Recenzowana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań, które mają przede wszystkim znaczenie aplikacyjne i ułatwią pracę konstruktorów w zakresie optymalnego doboru projektowanych komponentów. Mimo niedociągnięć, które wskazałem w niniejszym punkcie i punkcie 3 opinii, oceniam pracę doktorską jednoznacznie pozytywnie.

3. Uwagi, sugestie i spostrzeżenia

Oceniając formę pracy stwierdzam, że dysertacja jest napisana starannie, poprawnym i zrozumiałym językiem, a materiał ilustracyjny jest dobrze dobrany. Do drobnych zastrzeżeń, na które chciałbym zwrócić uwagę Autora zaliczam:

- podrozdział „Cel i teza rozprawy” powinien być głównym rozdziałem rozprawy umieszczonym po przeglądzie literatury, a nie częścią „Wstępu”,
- w rozprawach doktorskich pozycje literatury powinny być umieszczone w bibliografii alfabetycznie, a nie jak w przypadku artykułów w kolejności cytowania,
- wzory w dysertacji są częścią zdania, więc w tym przypadku należałoby stosować odpowiednie znaki interpunkcyjne,
- w przypadku odwołania do kilku pozycji literatury jednocześnie powinno się je umieszczać w jednym nawiasie oddzielone przecinkami, lub stosować przecinki pomiędzy nawiasami poszczególnych odniesień (np. str. 8: „... *innych podzespołów* [6] [7] [8].”, str. 9: „... *dokumentacji złożeniowej* [13] [14].”, itd.),
- rysunki 2.3, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3 i 3.5 wyglądają jak zaczerpnięte ze źródeł zewnętrznych, jednak brakuje odniesienie do pozycji literatury lub wskazania, że są to prace własne Autora,
- str. 7: w zdaniu „*Uproszczony schemat projektowania konstrukcji przedstawia rysunek 2.1 [2].*” użyto strony czynnej zamiast biernej, powinno być np. „*Uproszczony schemat projektowania konstrukcji przedstawiono na rysunku 2.1 [2].*”
- str. 54: w zdaniu „*Sposoby wyznaczania naprężenia zredukowanego określają hipotezy wyężeniowe.*” powinno być: „*Sposoby wyznaczania naprężenia zredukowanego określają hipotezy wyężeniowe.*”,
- str. 54: „*Hipoteza ta wyraża się wzorem (3.30) ...*” – nie ma takiego wzoru,

- tekst zawiera błędy interpunkcyjne oraz błędy w łamaniu tekstu tzw. bękarty (elementy te nie wymagały wyszczególnienia), a także literówki lub inne omyłki (błędnie napisane fragmenty podkreśliłem):
 - str. 3 – w zdaniu: „... zachodzi konieczność zautomatyzowania wszystkich czynności związanych procesem analizy numerycznej.”, powinno być „związanych z procesem”,
 - str. 28 – „Wyrażenia (3.16) oraz (3,17) mogą...”,
 - str. 76 – „... algorytmu ewolucyjnego rozpoczyna ...”,
 - str. 125 – „... oprogramowania metody elementów skończonych.”, str. 136 – „... oprogramowanie elementów skończonych.”, raczej „oprogramowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych.”,
 - str. 125 – „... z żurawim montowanym za kabiną kierowcy ...”,
 - str. 126 – w zdaniu: „Rozbudowaniu bazowej wersji autorskiego programu o odpowiednią klasę umożliwiło przeprowadzenie optymalizację konstrukcji innego typu ...” powinno być „Rozbudowanie bazowej wersji autorskiego programu o odpowiednią klasę umożliwiło przeprowadzenie optymalizacji konstrukcji innego typu ...”,
 - str. 126 – w zdaniu: „integracja z systemem zarządzania produkcji w ramach koncepcji Przemysłu 4.0.” powinno być „integracja z systemem zarządzania produkcją w ramach koncepcji Przemysłu 4.0.”,
 - str. 134 – 117. pozycja literatury: „Algorytmy genetyczne kompentium” powinno być „Algorytmy genetyczne. Kompendium”.

Podczas czytania rozprawy nasunęły się także pewne pytania i spostrzeżenia, które w celu lepszego wyjaśnienia i uzupełnienia treści merytorycznej chciałbym postawić Autorowi:

1. Na str. 20 napisano: „Często w rzeczywistych inżynierskich problemach optymalizacji występują skomplikowane funkcje celu, z licznymi ekstremami lokalnymi, dla których znalezienie ekstremum globalnego jest zadaniem trudnym”. Co dla Autora oznacza skomplikowana funkcja celu? Czy dotyczy to samego opisu matematycznego tej funkcji, czy może trudności wyznaczenia optimum globalnego?

2. Na str. 53 napisano: „*W niniejszej pracy sklejanie wykorzystywane jest do symulowania np. połączeń spawanych profili, które nie przecinają się.*”. Proszę o wyjaśnienie, w jakim celu „skleja” się nieprzecinające się profile?
3. Na str. 127 we Wnioskach napisano „... *zastosowane podejście sprawnie i szybko tworzy siatkę elementów skończonych danego typu konstrukcji o różnych wariantach; ...*” – nie do końca rozumiem, jak zastosowane podejście może sprawnie i szybko tworzyć siatkę elementów skończonych?
4. Czy istnieje możliwość zilustrowania krok po kroku, jak powstaje model obliczeniowy (od zdefiniowania punktów, poprzez szkielet podzespołów, powierzchnie z określonym rozmiarem siatki, siatkę elementów skończonych, kończąc na warunkach brzegowych) z wykorzystaniem opracowanej metodologii/programu dla przykładu pierwszego lub drugiego? Czy plik z rozszerzeniem .bdf jest plikiem tekstowym, czy binarnym? Jeżeli tekstowym, to czy można pokazać przykładowy plik.
5. Skąd wiadomo, że przyjęty w przykładach rozmiar elementów skończonych jest odpowiedni, czy prowadzono badania zbieżności siatki?
6. Za pomocą ilu genów jest zapisywana jedna zmienna projektowa w chromosomie? Czy wiadomo, jakie kodowanie chromosomów jest stosowane w programie DPEA?
7. W przykładzie drugim, na podstawie przeprowadzonej optymalizacji wielokryterialnej uzyskano masę o 18% lżejszą od istniejącej konstrukcji, natomiast nie pojawiła się informacja o różnicy w cenie materiału. Czy jest możliwe określenie procentowe zysku/straty?
8. Czas obliczeń dla procedur optymalizacyjnych to kilkadziesiąt godzin (w przykładzie 6.1 to 37 godzin, a w przykładzie 6.2 to 72 godziny dla jednego uruchomienia procedury optymalizacji). Czy nie jest to czas, który może wprowadzić opóźnienia w produkcji lub w szczególnych przypadkach („szybkie zlecenia”) rezygnację ze stosowania ww. procedur? Czy może dopiero zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwoli na implementację tych procedur w przedsiębiorstwie?
9. Czy w przypadku optymalizacji ramienia teleskopowego (rozdział 6.3) nie prościej było przygotować model geometryczny o zmiennych parametrach i przeprowadzić tzw. badanie projektu (optymalizacja) dla różnych konfiguracji konstrukcji, niż tworzyć osobną klasę w opracowanym programie?

10. Co oznacza określenie „konstrukcja koncepcyjna” ze str. 123?
11. Ponieważ dysertacja nie zawiera „klasycznego przeglądu literatury”, to czy Autor zna jakieś podobne rozwiązania dostępne na rynku lub publikacje związane z tematyką pracy?
12. Czy zaproponowana metodologia i napisane oprogramowanie zostały wdrożone w firmie produkcyjnej, z którą związany jest Doktorant?

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzowaną pracę stwierdzam, że do najważniejszych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie koncepcji tworzenia parametrycznego, modułowego modelu konstrukcji o zmiennej topologii, która pozwala na budowę wariantowych modeli konstrukcji mechanicznych i ich zautomatyzowane przygotowanie do obliczeń za pomocą oprogramowania wykorzystującego metodę elementów skończonych,
- opracowanie oprogramowania bazującego na paradygmacie programowania obiektowo orientowanego realizującego proponowaną metodologię wspomagania pracy projektanta konstrukcji mechanicznych,
- opracowanie interfejsów programowych umożliwiających wymianę informacji pomiędzy autorskim oprogramowaniem i innymi wykorzystywanymi w pracy programami,
- opracowanie relacyjnej bazy danych przechowującej informacje o podwoziach i urządzeniach wykorzystanych do budowy danego pojazdu.

Wartość naukową i poznawczą oraz znaczenie aplikacyjne pracy oceniam pozytywnie, a zaproponowane rozwiązania zrealizowane z twórczym udziałem jej Autora można uznać za dowód wiedzy i wartościowych osiągnięć w zakresie dyscypliny mechanika (obecnie inżynieria mechaniczna) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Przedstawione w powyższych punktach uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Spyry.

Konkludując stwierdzam, że opiniowana dysertacja mgra inż. Grzegorza Spyry pt. „*Metody inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach projektowania i optymalizacji wybranych elementów konstrukcyjnych zabudów samochodów ciężarowych*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowo-inżynierskiego i spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązującej Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stanowi zatem podstawę do dopuszczenia jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

David Cekus