

prof. ndzw dr hab. inż. Andrzej GRZĄDZIELA  
Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów  
Wydział Mechaniczno - Elektryczny  
Akademia Marynarki Wojennej

Gdynia 07-02-2024 r.

## **OPINIA pracy doktorskiej**

**mgr inż. Artura Króla**

p.t.

### **ENGINEERING KNOWLEDGE MANAGEMENT WITH THE USE OF THE “DIGITAL TWINS” METHOD**

**Podstawa prawna oceny:** uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 25 października 2023 roku.

#### **WPROWADZENIE**

W ostatnich latach coraz bardziej widoczna w przemyśle wydaje się dbałość o efektywność energetyczną, wykorzystanie metod symulacyjnych oraz wdrażanie sztucznej inteligencji. Wszystkie te pojęcia są ściśle ze sobą związane i dotyczą wyzwań związanych z tzw. rewolucjami przemysłowymi 4,0 i 5,0.

Początek XXI wieku to gwałtowny rozwój komputeryzacji we wszystkich obszarach przemysłowych aczkolwiek na co dzień bardzo widoczne jest to m.in. w produktach przemysłu motoryzacyjnego. Choć dla przeciętnego użytkownika zauważalnymi technologiami są nowe systemy napędowe i automatyzacja obsługi pojazdu to zmiany technologiczne dotyczą zarówno rozwiązań docelowych jak i procesów produkcyjnych wszystkich podzespołów samochodu. Kierunek tych zmian jest zarówno proekologiczny jak i jakościowy. Działania obejmują wykorzystanie współczesnych narzędzi komputerowych takich jak CFD (*Computational Fluid Dynamics*), FEA (*Finite Element Analysis*) oraz MBD (*Multibody Dynamics*).

**Biuro Dziekana**

Wykorzystanie współczesnych narzędzi informatycznych do automatycznego procesu planowania, prototypowania i zarządzania produkcją podzespołów pojazdów jest przykładem wdrożenia idei rewolucji technologicznych w przemyśle motoryzacyjnym. Zastosowanie w dysertacji techniki prototypowania „*Digital Twins*”, zwanej powszechnie w Polsce cyfrowymi bliźniakami, potwierdza wdrożenie nowoczesnych metod projektowania zorientowanego. Przedstawione argumenty jednoznacznie wskazują na aktualność podjętego tematu pracy oraz użyteczność wykorzystania jej rezultatów.

## STRUKTURA PRACY

Praca jest napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów, streszczeń w językach angielskim i polskim oraz bibliografii liczącej 70 pozycji literaturowych oraz cytowanych stron internetowych. Całość została zawartą na 114 stronach.

Rozdział 1 jest wprowadzeniem, w którym Autor przedstawia motywacje do podjęcia tematu doktoratu oraz mapę drogową będącą przewodnikiem po dysertacji. Ponadto, wyjaśnia anglojęzyczne pojęcia zarządcze używane w firmie Tenneco oraz przedstawia obiekt analiz jakim jest kolumna McPerson'a a właściwie jej dwa elementy tj. wspornik stabilizatora teleskopowego oraz tłoczysko amortyzatora. W rozdziale dokonano analizy działania amortyzatora celem wyjaśnienia złożoności problemu projektowego oraz wykorzystania techniki cyfrowych bliźniaków dla uzyskania wysokiej efektywności jakościowej i ekonomicznej.

W rozdziale 2 zaprezentowano definicje „*Digital Twins*” oraz jej rolę w prototypowaniu. Scharakteryzowano historyczny rozwój kolejnych rewolucji przemysłowych, wskazano na kamienie milowe oraz powiązano je z celami pracy. Przeprowadzono dyskusję nad różnymi definicjami cyfrowych bliźniaków a na koniec rozdziału zaproponowano propozycję definicji „*Digital Twins*” spełniającej kryteria trafności i dopasowania do tematu dysertacji.

Rozdział 3 to syntetyczne zdefiniowanie celów i zakresu rozprawy w aspekcie przemysłu motoryzacyjnego. Autor prezentuje wyniki analiz z raportów stowarzyszeń motoryzacyjnych dotyczących trendów rozwojowych w motoryzacji w ostatnich latach. Na tym tle przedstawia główne problemy badawcze jakimi są redukcja czasu projektowania, wykorzystanie technik symulacyjnych oraz digitalizacja systemów projektowych i łączenie ich z procesami produkcyjnymi. Na koniec rozdziału zostaje przedstawiony cel główny pracy jakim

jest wdrożenie cyfrowych bliźniaków i wykorzystanie testów walidacyjnych do poprawy dokładności symulacji i przewidywania rozwiązań konstrukcyjnych analizowanych elementów.

W rozdziale 4 Autor charakteryzuje procesy zarządzania w projektowaniu i produkcji. Prezentuje strukturę organizacyjną oraz procesy zarządcze, decyzyjne i przepływu informacji. Prezentowane mapy procesów zarządczych oraz tabele oceny działań charakteryzują kolejne etapy oraz wskazują na sprzężenia zwrotne w procesach decyzyjnych. W końcowej części rozdziału prezentowane są graficzne bazy danych identyfikujące przykładowo specyfikacje materiałowe, klasyfikację rozwiązań technicznych oraz raporty z symulacji MES wraz z wnioskami.

Zastosowanie cyfrowych bliźniaków jest zaprezentowane w rozdziale piątym. Autor przedstawia kolejne kroki implementacji w postaci graficznej a następnie charakteryzuje proces definiowania cyfrowego na przykładzie wspornika stabilizatora oraz tłoczyska amortyzatora. W dalszej części przedstawia procedury symulacyjne i optymalizacyjne wskazując, że celem badań numerycznych jest uzyskanie katalogu danych i parametrów fizycznych do momentu wirtualnego uszkodzenia elementu. Badania są poparte modelami zorientowanymi uszkodzeniowo pozwalającymi na ocenę trwałości. Zastosowanie cyfrowego bliźniaka oraz modelu zużyciowego Wöhler'a pozwala na przewidywanie uszkodzeń zorientowanych zmęczeniowo a prezentowane testy statystyczne Weibull'a potwierdzają trafność modeli symulacyjnych walidowanych z testami rzeczywistych obiektów badań. Autor wskazuje, że takie działanie pozwala na wirtualne korekty kształtu i uzyskanie optymalnych parametrów eksploatacyjnych obiektu oczekiwanych przez odbiorcę produktu.

Rozdział 6 przedstawia wnioski i przewidywane tematy dalszych badań Autora. Podsumowanie precyzuje osiągnięcia w obszarach projektowych, zarządzania oraz ekonomicznych. Autor swoje wnioski potwierdza wynikami tabelarycznymi wraz z szerokim komentarzem. Wyszczególnienie dalszych tematów badawczych potwierdza krytycyzm Autora do osiągniętych celów oraz doskonałą znajomość potrzeb rozwojowych w obszarach prototypowania i projektowania oraz zarządzania produkcją w firmie Tenneco.

Bibliografia dysertacji zawiera co prawda 70 pozycji literaturowych jednak nie zauważyłem cytowań autorskich.

## **MOCNE STRONY PRACY**

Praca jest napisana bardzo logicznie i przejrzysto. Układ pracy jest spójny i konsekwentny a wprowadzenie pojęć stosowanych w macierzystej firmie znacząco ułatwia zrozumienia celów pracy. Zastosowany język angielski jest precyzyjny przez co praca nie jest wyzwaniem lingwistycznym dla czytelnika. Struktura pracy nie jest typowa ale odpowiada celom doktoratów wdrożeniowych.

Podjęty przez Autora temat jest multidyscyplinarny i wiąże ze sobą Dziedzinę nauk inżyniersko-technicznych (inżynierię mechaniczną oraz inżynierię lądową i transport) oraz Dziedzinę nauk społecznych w postaci dyscypliny nauk o zarządzaniu i jakości. Analizując zakres i cele pracy należy zwrócić uwagę, że dysertacja na pewno może być rozpatrywana w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Prezentowane wyniki badań i analiz własnych wskazują na bardzo duże doświadczenie inżynierskie Autora oraz jego syntetyczne podejście do problemów zarządzania na różnych poziomach gotowości technologicznej projektów.

W pracy widoczny jest precyzyjny i logiczny plan przygotowania prezentacji osiągnięć. Prezentacje algorytmów i konfiguracji systemowych są wyjaśniane i prezentowane graficznie. Takie podejście do osiągnięcia postawionych celów redukuje możliwość powstania błędów grubych oraz uzyskania rezultatów wątpliwych badawczo. Przeprowadzone badania oraz analizy wymagały od Autora doświadczenia praktycznego, wielu przygotowań technicznych oraz organizacyjnych a także umiejętności wykorzystania szerokiego spektrum danych z różnych źródeł.

Przykładowe wyniki badań na wytypowanych dwóch obiektach zostały zaplanowane bardzo drobiazgowo i w pełni korespondują z prezentowanymi algorytmami systemów zarządzania i walidacji. Prowadzona krytyczna dyskusja nad dalszymi celami badawczymi zawarta w rozdziale szóstym potwierdzają świadomość ograniczeń i słusznie wskazują Autorowi potrzebę dalszych badań o szerszym zakresie.

## **UWAGI KRYTYCZNE**

Postęp w nauce jest wynikiem dyskusji i ścierania się odmiennych poglądów stąd też w każdej pracy dopatrzeć się można niedociągnięć czy dyskusyjnych założeń lub tez. W przypadku otrzymanej do recenzji rozprawy uwagi można podzielić na merytoryczne i redakcyjne.

Oдноśnie uwag merytorycznych to wątpliwości budzi przyjęta struktura objętościowa pracy. Autor poświęcił pierwszych 41 stron na wprowadzenie do tematu oraz na definicje. Z punktu widzenia całości pracy wydają się to zbyt dużo i wskazuje na brak syntetycznego podejścia do zasadniczego tematu.

W pracy Autor nie definiuje żadnych pojęć z obszaru inżynierii, które można by było zdefiniować w postaci wzorów zastosowanych w badania i analizach. Wydaje się to zaskakujące tym bardziej, że w drugiej części pracy prezentuje graficznie wyniki analiz krzywych Wöhler'a i statystyki metodą Weibull'a.

W rozdziale czwartym prezentowane grafy procesów nie są cytowane ani nie mają potwierdzenia czyjego są autorstwa. Stwarza to wrażenie opisu stanu zarządzania w firmie a nie uzyskanych wyników autorskich. Problematicznym jest zatem odróżnienie tego co jest strukturą firmy Tenneco a co działaniem autorskim doktoranta.

Autor w podrozdziale 4.3 *Design element classification* prezentuje przykładowe bazy danych przeznaczonych opisu elementów projektowych. Analizując warunki pracy amortyzatorów samochodowych dość zaskakującym jest bardzo skromne podejście do analizowanych podstawowych cech materiałowych jakimi są skład, wydłużenie czy podstawowe wytrzymałości. Rzeczywiste warunki pracy rozpatrywanych elementów amortyzatora wskazują na potrzebę analizy wpływu wilgotności (podatności na korozję) a także zmian fizycznych parametrów materiałów w zakresie szerokiego spektrum temperatur. Kolejną wątpliwością jest brak opisu potencjalnych błędów wprowadzonych do cyfrowego bliźniaka gdyż zakładane parametry wytrzymałościowe, wskazane na rysunku 33 oraz opisane na stronie 68, mają rozrzut od wartości średniej  $\pm 5\%$ .

Wątpliwość budzi również brak analizy błędów pomiarowych. Autor, pomimo dostępu do dokumentów, zaniechał oceny wpływu rozrzutu parametrów fizycznych w symulacjach numerycznych cyfrowych bliźniaków. Co prawda pokazano na rysunkach 50 oraz od 56 do 60 wyniki analiz trwałości bliźniaka cyfrowego ale nie odnosi się do zakresu wartości założonych parametrów inicjujących w modelu.

Wątpliwości budzi również użycie pojęcia „*Prediction*” jako funkcji procesu wprowadzone na stronie 39. Zarówno w medycynie jak i w technice pojęcie „*prediction*” jest bardziej związane z odgadywaniem jak długo część maszyny będzie sprawna lub jak długo pacjent będzie żył. Wydaje się, że bardziej odpowiednim pojęciem byłoby „*an assessment of prognosis*” gdyż pojęcie to wymaga określenia zakresu przeżycia na podstawie odpowiednich danych symulacyjnych lub walidacyjnych, co mam miejsce w firmie Tenneco.

Szkoda, że Autor nie podjął dyskusji nad wynikami oceny trwałości za zaprezentowanymi na rysunkach od 56 do 63. Stosowne komentarze do prezentowanych wyników znacząco podniosłyby jakość przekazu i jednoznacznie wskazałyby na dominujący wpływ inżynierii mechanicznej w treści dysertacji.

Uwagi redakcyjne należałoby rozpocząć od graficznej pracy, która jest dość daleka od zaleceń PWN. Autor stosuje czcionkę *Calibri* oraz styl cytowania *Chicago Manual of Style 17th edition (author-date)* lub podobny np. *American Psychological Association 7th edition*. Taka konwencja powoduje brak numeracji w Bibliografii i trudności z analizą literaturową przez czytelnika.

Kolejna z uwag dotyczy kwestii prezentacji graficznej przepływów informacji w procesach – rysunki 27, 28, 30, 31 i 32. Grafiki wyglądają na zrzuty ekranowe przez co treści na rysunkach są absolutnie nieczytelne. Rysunki należałoby wykonać samodzielnie, dopasować czcionkę w oknach do wartości minimum 10 pkt. co znacząco podniosłoby ocenę dbałości edytorskiej Autora. Podobne uwagi można odnieść również do rysunków 38, 42, 46, 51, 54, 55, 56, 57 i 66. Dodatkowo, na wskazanych rysunkach podpisy osi i jednostek są nieczytelne.

## **PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY**

Przedstawiona do recenzji praca „ENGINEERING KNOWLEDGE MANAGEMENT WITH THE USE OF THE “DIGITAL TWINS” METHOD” niezależnie od przedstawionych uwag krytycznych i dyskusyjnych na pewno spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w Dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych i Dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna, świadczy o dużym i profesjonalnym wkładzie Autora w planowanie, realizację eksperymentów badawczych, umiejętność kierowania pracami rozwojowymi i wnioskowania z badań symulacyjnych a także wykorzystania współczesnych procedur zarządczych w inżynierii produkcji.

Wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Artura Króla do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

