

Szczecin 10.04.2023

Prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Recenzja pracy doktorskiej pt. ” System ekspercki, oparty o wnioskowanie rozmyte, wspierający produkcję kadłubów ADI, silnika PW1000G, z użyciem centr obróbczych CNC” autorstwa mgr inż. Grzegorza Bomby.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRz z dnia 30.11.2022.

1. Przedstawienie treści pracy

Przemysł maszynowy podlega szybkim przemianom można śmiało powiedzieć, że zmiany te mają charakter rewolucyjny, a analitycy nazwali ten proces czwartą rewolucją przemysłową „Przemysł 4.0”. Głównym wyznacznikiem tej rewolucji jest cyfryzacja procesów projektowych i produkcyjnych. W obszarze technologii wytwarzania bardzo rozwijają się metody cyfrowego nadzory prawidłowości realizacji procesów produkcyjnych. Podejmuje się liczne prace w zakresie zastosowania metod sztucznej inteligencji do analizy i sterowania procesami produkcyjnymi. Rozwój techniki komputerowej oraz postęp w zakresie algorytmów obliczeniowych i oprogramowania do budowy i trenowania sztucznych sieci neuronowych daje konstruktorom nowe możliwości budowy coraz bardziej zaawansowanych modeli neuronowych analizujących procesy produkcyjne. Działania te zmierzają do budowy kompleksowych modeli cyfrowych do opisu złożonych struktur technicznych i ich funkcjonalności. Działania te mieszczą się w ogólnym trendzie szeroko pojętej cyfryzacji procesów produkcyjnych, a opracowywane struktury cyfrowe nazywane są „Cyfrowymi bliźniakami” (Digital Twins). Ważną rolę w procesie cyfryzacji produkcji odgrywają badania nad zagadnieniami sztucznej inteligencji. Obserwuje się wyraźny postęp w technikach cyfrowej symulacji z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. Opracowanie

nowych technologii *deep learning* i *cognitive computing* dały silne wsparcie analityce predyktywnej złożonych problemów fizycznych. Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w tę bardzo interesującą tematykę, niezmiernie ważną dla rozwoju technik nadzorowania oraz projektowania procesów technologicznych. Pan mgr inż. Grzegorz Bomba podejmuje się realizacji badań nad problematyką kontroli dokładności procesów obróbki skrawaniem złożonych komponentów silnika lotniczego, realizowanych na centrach obróbczych CNC. W recenzowanej pracy Autor zaproponował autorską, metodę kontroli dokładności wymiarowej produkowanych części z zastosowaniem technologii ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), bazującej na modelach neuronowo-rozmytych – łączących zalety procedur logiki rozmytej z dużym potencjałem algorytmów sztucznych sieci neuronowych. W efekcie końcowym Autor zaprojektował procedury kontroli wymiarowej zgodne z założeniami rozwiązań CDT (*Closed Door Technology*) o dużym potencjale wdrożeniowym, istotnie upraszczające proces produkcyjny i redukujące jego koszty.

Opiniowana praca doktorska liczy 179 strony i składa się z dziesięciu rozdziałów, streszczenia w języku angielskim oraz spisu literatury zawierającego zestaw 95 cytowanych pozycji literaturowych, zamieszczonego na końcu monografii. Dobór źródeł literaturowych jest prawidłowy i nie budzi zastrzeżeń. Autor dogłębnie przeanalizował dostępne źródła i wyciągnął poprawne wnioski podsumowujące stan wiedzy. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wprowadzenie, cel i tezy pracy, analizę dostępnej literatury i istniejącego stanu techniki, oraz sześciu rozdziałów merytorycznych zakończonych wnioskami końcowymi i omówieniem perspektyw wdrożenia wyników badań.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor definiuje problem i omawia specyfikację akcesoryjnych przekładni lotniczych silnika PW1000G. Ponadto zaprezentowano wprowadzenie do zagadnienia wytwarzania zgodnie z koncepcją CDT. W rozdziale drugim Autor przedstawia cele i zakres pracy oraz formułuje tezę badawczą. Przyjęty cel i zakres pracy oraz jej teza nie budzą zastrzeżeń i są adekwatne do rozwiązywanych problemów naukowych.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił przegląd istniejącego stanu wiedzy oraz analizę źródeł literaturowych. Z prezentowanej analizy wyciągnięto prawidłowe wnioski o potrzebie kontynuowania badań realizowanych w ramach doktoratu.

W rozdziale czwartym Autor opisał metodę sprawdzania jakości obrabiarki z zastosowaniem przedmiotu próbnego. Metoda ta została wybrana do kontroli obrabiarki w ramach realizowanych badań.

W kolejnym, piątym rozdziale Autor prezentuje problemy pomiaru geometrii przedmiotu obrabianego, bezpośrednio na obrabiarce CNC, z zastosowaniem sond dotykowych. Prezentowana jest analiza jakości pomiarów realizowanych z zastosowaniem tych sond.

Rozdział szósty zawiera opis eksperymentów pomiarowych służących do pozyskania danych z procesu obróbki mechanicznej pokrywy przekładni. Ponadto zaprezentowano wyniki analizy tych danych.

W kolejnym rozdziale siódmym zaprezentowano opis procedury generowania danych syntetycznych. Ponadto zaprezentowano sposób i wyniki ich oceny, pod kątem możliwości ich zastosowania do trenowania inteligentnych algorytmów systemu ANFIS.

W rozdziale ósmym i dziewiątym Autor opisał procedury uczenia, doboru struktury i oceny jakości układów neuronowo-rozmytych zastosowanych do wspomaganie kontroli jakości pokryw przekładni silnika lotniczego.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w którym Autor wyciągnął wnioski z przeprowadzonych badań i ocenił poziom weryfikacji postawionych w pracy tez. Ponadto opisano aplikację wdrażającą wyniki pracy w zakładzie Pratt&Whitney Rzeszów S.A.

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie zaprezentowanej analiz i wyników badań numerycznych i eksperymentalnych Autor rozwiązał postawiony problem naukowy i udowodnił postawioną tezę badawczą.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Bardzo dużym atutem pracy doktorskiej Pana Grzegorza Bomby jest wdrożeniowy charakter proponowanych rozwiązań. Aspekt wdrożeniowy jednak nie umniejsza wartości naukowej pracy, co jest warte szczególnego podkreślenia w przypadku doktoratów wdrożeniowych. Autor posiada dużą wiedzę praktyczną z zakresu kontroli jakości procesów produkcyjnych, co miało przełożenie na wysoki poziom praktyczny pracy. Ponadto Autor ma niezwykle dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie komputerowego modelowania i symulacji cyfrowych złożonych problemów technicznych. W szczególności Autor posiada rozległą wiedzę z zakresu

zaawansowanych algorytmów logiki rozmytej oraz zastosowania sztucznych sieci neuronowych w aspektach technicznych. Recenzowana praca doktorska ma silny pierwiastek informatyczny zaadoptowany na grunt inżynierii mechanicznej, a w szczególności technologii obróbki skrawaniem i kontroli jej jakości. Autor ma świadomość zachodzących przemian w obszarze inżynierii mechanicznej sprawiających, że komponent informatyczny zaczyna odgrywać coraz ważniejszą rolę w projektowaniu i nadzorowaniu procesów technologicznych realizowanych na obrabiarkach CNC. Wyniki pracy badawczej Pana Grzegorza Bomby dostarczają narzędzi wspomagających kontrolę jakości procesów obróbki skrawaniem. Należy również zaznaczyć, że Autor w celu walidacji proponowanych rozwiązań oraz procedur ANFIS przeprowadził szereg badań eksperymentalnych wykazując przy tym wysokie umiejętności ich planowania i analizy otrzymanych wyników. Zrealizowane eksperymenty doświadczalne potwierdził poprawność działania opracowanych algorytmów i modeli ANFIS. Zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie, a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Opracowanie autorskiej koncepcji systemu bazującego na technologii ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), do kontroli dokładności geometrycznej procesu obróbki skrawaniem elementów silnika lotniczego zgodnie z założeniami CDT (*Closed Door Technology*).
2. Opracowanie procedury przygotowania dodatkowych danych syntetycznych do procedury uczenia systemu ANFIS do kontroli dokładności geometrycznej obróbki.
3. Wyniki badań eksperymentalnych weryfikujące skuteczność działania systemu ANFIS do kontroli dokładności geometrycznej procesu obróbki części, stanowiące przykład metodyczny wdrażania systemu w warunkach produkcyjnych.
4. Cel praktyczny: wdrożenie systemu ANFIS w zakładach produkcyjnych Pratt&Whitney Rzaszów S.A..

Bardzo wysoko oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć. Ważnym osiągnięciem Autora są również efekty ekonomiczne wynikające z wdrożenia opracowanej technologii kontroli produkcji.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Na str. 17 w rozdziale opisującym kontrolę dokładności obrabiarki Autor stwierdza, że badania z zastosowaniem przedmiotu próbnego „...staje się podstawowym testem dokładności geometrycznej oraz precyzji pozycjonowania maszyny.” Tę myśl Autor ponownie prezentuje w rozdziale 4.1 na str.39. Takie stwierdzenie jest zdecydowanie przesadzone i nie można się z nim zgodzić. Oczywiście badania pracą są istotnym elementem kontroli dokładności obrabiarek, ale jest to jedynie test technologiczny dający ogólny pogląd na dokładność obrabiarki i jej sztywność technologiczną – błędy pod wpływem obciążenia siłą skrawania (nie wspominam tu o aspektach termicznych). Wyniki tych badań trudno jest zdekomponować na błędy osi i zastosować do analizy dokładności geometrycznej obrabiarki pod kątem korygowania maszyny. Obecnie dostępne są na rynku laserowe systemy pomiarowe typu LaserTracer NG do pomiaru błędów wolumetrycznych obrabiarki w całej przestrzeni roboczej. To tego typu pomiary są obecnie podstawowymi technikami oceny dokładności obrabiarek CNC, dającymi możliwość korekcji błędów wolumetrycznych w układzie sterowania CNC obrabiarki. Ich uboższą wersją są pomiary laserowe dokładności poszczególnych osi. Należy tu jeszcze wspomnieć, że bardzo ważną funkcję w budżecie błędów obrabiarki pełnią błędy wrzeciona. Tu również dostępne są odpowiednie systemy pomiarowe do kontroli zachowania się wrzeciona w funkcji czasu pracy (narastająca temperatura) oraz prędkości obrotowej (błędy osiowości i siły odśrodkowe). Testy „ball bar”, które są tak naprawdę testami nastawów serwonapędów, czy badania pracą nie są podstawowymi badaniami dokładności geometrycznej obrabiarek.
2. W rozdziale 7.4 dotyczącym interpolacji danych pomiarowych dla celów zwiększenia ilości danych do procesów nauczania modelu ANFIS, zastosowano techniki interpolacji danych z pomiaru, do których dopasowano stosowne krzywa i na ich podstawie wygenerowano dodatkowe dane syntetyczne. Czy Autor nie brał pod uwagę faktu, że zastosowanie funkcji interpolujących zakłada, że istnieje jakaś funkcyjna zależność pomiędzy kolejnymi pomiarami w punktach n i $n+1$, a to zaprzecza probabilistycznemu charakterowi rozrzutów rejestrowanych pomiarów? Czy Autor rozważał możliwość zastosowania autoregresyjnych modeli typu ARMA zarejestrowanych sygnałów pomiarowych, do generowania dodatkowych, syntetycznych danych, które wspomnianej

wady nie mają? Modele te są powszechnie używane w analizie modalnej do generowania danych syntetycznych z pomiarów drgań konstrukcji.

3. Uwaga dyskusyjna. Zaprezentowana w pracy technologia oceny dokładności geometrycznej obróbki skrawaniem była testowana na konkretnej technologii obróbki pokrywy przekładni do silnika lotniczego. Czy Autor widzi możliwość uogólnienia tej technologii kontroli na inne warianty wytwarzania części maszyn z zastosowaniem obróbki skrawaniem?

Tekst pracy został napisany starannie, część edytorska pracy jest na najwyższym poziomie i zasługuje na bardzo wysoką ocenę. W trakcie czytania pracy wykryłem pewne drobne błędy redakcyjne:

- Str. 9, ostatni akapit: indukcyjne -> indukcyjnie.
- Str.10, pierwszy akapit: wymagało -> wymagała.
- Str.17, pierwszy akapit: kontrolo -> kontroli.
- Str. 23, ostatni akapit: siec -> sieć.
- Str. 29, rys.3.12: błędny opis rysunku.
- Str.35 i 36, wzory 3.10 do 3.14: brak konsekwencji w oznakowaniu zmiennych: raz jest μ_{Ai} potem μAi , raz jest \bar{w} potem jest \bar{w}_l , raz jest $O_{1,i}$ potem jest $O_i^{(2)}$, iloczyn oznaczany różnymi symbolami $\times, ', *$ itd. – to dotyczy wielu wiorów w pracy.
- Str.56, ostatni akapit: pierście-nia -> pierścienia.
- Str.57, pierwszy akapit: we-dług -> według.
- Str.59, ostatni akapit: przeprowadza-nia -> przeprowadzania.
- Str.60, trzeci akapit akapit: „pomiaru pomiarowego” ...?
- Str.62, piąty akapit: wyma-gań -> wymagań.
- Str.66, trzeci akapit: na -> ma.
- Str.70 i 71, ostatni i pierwszy akapit: otrzymywana -> otrzymywane.
- Str.75, pierwszy akapit: skrawani -> skrawania.
- Str.140, rys.9.2 jest identyczny jak rys.8.1, zatem nic nie wnosi do pracy.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. (z późniejszymi zmianami). Zrealizowana przez mgr. inż. Grzegorza Bombę praca charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem innowacyjności. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego, którego rozwiązanie stanowi nowy wkład wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

