

dr hab. inż. Sławomir Kłos, prof. UZ  
Wydział Mechaniczny  
Uniwersytet Zielonogórski  
Ul. Szafrana 4  
65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 12.08. 2019 r.

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Skobieja pt.:**

**” Szeregowanie zadań w systemach produkcyjnych z wykorzystaniem  
hybrydowego algorytmu genetyczno-rozmytego z symulacją”**

### **1. Obszar problemowy rozprawy**

Problematyka rozprawy doktorskiej dotyczy zagadnień szeregowania zadań produkcyjnych i jest jednym z kluczowych obszarów badań dotyczących problematyki harmonogramowania produkcji. Tematyka podjęta przez doktoranta jest szczególnie istotna i aktualna, w kontekście implementacji koncepcji Industry 4.0 w przedsiębiorstwach produkcyjnych i nowych wyzwań związanych ze zmieniającymi się modelami obsługi klienta oraz nowym podejściem do problematyki planowania i sterowania produkcją (np. koncepcja mass customization). Wiele przedsiębiorstw nie może poradzić sobie z problemami skutecznego harmonogramowania produkcji, pomimo wdrożenia informatycznych systemów klasy ERP, ze względu na ograniczoną funkcjonalność tych systemów w zakresie szeregowania zadań. Nawet niektóre duże przedsiębiorstwa harmonogramują dziś produkcję przy użyciu prostych narzędzi informatycznych typu MS Excel, ze względu na małą elastyczność i ograniczoną funkcjonalność algorytmów harmonogramowania implementowanych w systemach ERP. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji dla potrzeb harmonogramowania produkcji jest kluczowe z punktu widzenia efektywnej obsługi zleceń produkcyjnych przy zmieniających się wymaganiach klientów. Bardzo ważna w procesie harmonogramowania produkcji jest również ocena skuteczności harmonogramowania. Autor opiniowanej dysertacji proponuje zastosowanie dwóch głównych kryteriów oceny skuteczności harmonogramowania: minimalizacji czasu produkcji oraz minimalizacji sumy czasów opóźnień zadań traktowanych rozłącznie.



Z przedstawionego kontekstu wynika, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Skobieja dotyczy istotnych problemów dotyczących dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn w zakresie harmonogramowania produkcji. Autor rozprawy proponuje zastosowanie koncepcji holistycznego modelowania procesu produkcyjnego, dla potrzeb poprawy szeregowania zadań produkcyjnych. Głównym założeniem nowej metody harmonogramowania jest to, że zbiór reguł sterujących systemem decyzyjnym będzie ulegał ewolucji w procesie uczenia maszynowego. Doktorant określił cztery najważniejsze cele naukowe, do których zaliczył: budowę modelu symulacyjnego zadanego procesu wytwórczego, zaprojektowanie i implementację agenta wsparcia decyzyjnego opartego na systemie regułowym, opracowanie algorytmu uczenia maszynowego i integrację poszczególnych składowych systemu oraz weryfikację działania systemu w oparciu o metodę symulacji komputerowej. Sformułowana przez Doktoranta teza pracy oraz określone cele badawcze nie budzą zastrzeżeń.

Uważam, że podjęcie przez Doktoranta przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych jak również praktycznych możliwości zastosowań proponowanych rozwiązań w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Badania przedstawione w recenzowanej pracy są istotne dla procesu planowania produkcji i mogą stanowić wstęp do budowy wieloagentowego, holistycznego modelu systemu produkcyjnego, który umożliwi automatyczne generowanie reguł sterujących pracą agentów w oparciu o metody uczenia maszynowego.

## **2. Kompozycja i treść rozprawy**

Opiniowana praca liczy 123 stron tekstu i składa się z 6 rozdziałów, dodatku, spisu rysunków, spisu tabel, spisu literatury oraz streszczenia w wersji polskiej i angielskiej. Niestety tekst pracy nie został poprzedzony spisem najważniejszych oznaczeń co ułatwiłoby interpretację skrótów i wzorów zawartych w tekście pracy. Załączony spis cytowanej literatury obejmuje 207 pozycji, w tym zawiera się 7 publikacji Doktoranta (wszystkie współautorskie). Kilka pozycji literaturowych znajdujących się w bibliografii jest starsze niż 20 lat, dlatego spis literatury można byłoby rozszerzyć o kilka bardziej aktualnych pozycji dotyczących zastosowania algorytmów genetycznych w procesie harmonogramowania produkcji, takich jak: *A genetic algorithm for permutation flow shop scheduling under make to stock production system*, Computers & Industrial Engineering, Volume 90, 2015,

(Humyun Fuad Rahman, Ruhul Sarker, Daryl Essam), *An optimization algorithm for integrated remanufacturing production planning and scheduling system*, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 105, 2017, (Haijun Wen, Shiwang Hou, Zhaohua Liu, Yongjiang Liu) czy też *An improved optimization procedure for production and injection scheduling using a hybrid genetic algorithm*, Chemical Engineering Research and Design, Volume 131, 2018, (Vahid Azamipour, Mehdi Assareh, Georg Martin Mittermeir). Przegląd literatury został wykonany rzetelnie zarówno pod względem merytorycznego doboru źródeł jak i powiązania źródeł z problematyką dysertacji.

Z merytorycznego punktu widzenia opiniowaną pracę można podzielić na dwie części. Pierwsza część (rozdziały 1 i 2) obejmuje analizę stanu wiedzy dotyczącej problematyki szeregowania zadań oraz wdrażania koncepcji Industry 4.0 w przedsiębiorstwach produkcyjnych. W tej części przedstawiono między innymi związki tematyki pracy z koncepcją czwartej rewolucji przemysłowej oraz przedstawiono rzeczywisty system produkcyjny, który był inspiracją do prowadzenia badań. Dla potrzeb prac badawczych opisanych w pracy Doktorant posłużył się modelem obejmującym fragment rzeczywistego systemu produkcyjnego złożonego z dwóch maszyn CNC i bufora międzymaszynowego w którym realizowana jest produkcja potokowa (ang. flow shop). Przyjęto założenia o nieograniczonej pojemności bufora międzyoperacyjnego oraz uwzględniono wyłącznie czasy jednostkowe o charakterze deterministycznym. Oczywiście takie założenia mocno upraszczają badany model systemu, chociaż są akceptowalne, ze względu na pomijalnie krótkie czasy przebrojeń w maszynach CNC oraz przy założeniu ich bezawaryjnej pracy. W podrozdziale 1.4 przedstawiono problem szeregowania zadań z uwzględnieniem zarówno minimalizacji czasu realizacji produkcji (wszystkich zadań) jak również minimalizacji sumy opóźnień poszczególnych zadań.

W rozdziale 2 przedstawiono wybrane metody szeregowania zadań produkcyjnych. Brakuje na końcu tego rozdziału tabelarycznego zestawienia wyników harmonogramowania dla potrzeb analizy porównawczej poszczególnych algorytmów. Generalnie w rozdziale 2 brakuje podsumowania, które uzasadniłoby celowość przeprowadzonej analizy metod szeregowania zadań oraz umożliwiło np. klasyfikację omówionych metod lub określenie obszarów przydatności.

Druga część pracy obejmuje rozdziały od 3 do 6 przy czym w rozdziale 3 zdefiniowano tezę i cele badawcze. Na uwagę zasługuje holistyczne podejście Doktoranta do problematyki harmonogramowania produkcji i szeregowania zadań. W tezie pracy Autor stwierdza, że „Zastosowanie koncepcji holistycznego modelowania procesu produkcyjnego, w którym

zestaw reguł sterujących systemem decyzyjnym ulegać będzie ewolucji w procesie uczenia maszynowego, umożliwi poprawę uszeregowania zadań produkcyjnych”.

W odniesieniu do tezy nasuwa się pierwsze pytanie:

**W stosunku, do jakich metod szeregowania zadań uzyskamy poprawę stosując zaproponowane podejście holistyczne? Czy chodzi o wszystkie metody opisane w rozdziale 2 czy tylko niektóre z nich?**

Rozdział 4 zawiera opis autorskiego, uczącego się systemu wspierającego podejmowanie decyzji w zakresie harmonogramowania produkcji. Przedstawiono w nim nowatorski system wspomaganie decyzji w zakresie harmonogramowania produkcji, złożony z: komponentu odkrywania (opartym na algorytmie genetycznym), komponentu wykonawczego, komponentu uczenia się oraz modelu symulacyjnego. System wspomaganie decyzji oparty jest na agentach podejmujących decyzje dotyczące szeregowania zadań w oparciu o logikę rozmytą. W rozdziale 5 doktorant przeprowadził weryfikację funkcjonalności zaprojektowanego systemu wspomaganie decyzji w oparciu o zestaw 100 zadań uczących. Przeprowadzono 4 procesy uczenia maszynowego, w których wykorzystano algorytm genetyczny oraz algorytm symulowanego hartowania. Następnie w celu sprawdzenia efektywności procesu uczenia oraz oceny jakościowej wyznaczonych chromosomów zastosowano trzy zestawy danych. Rzeczywiste dane dotyczące zleceń produkcyjnych uzyskane z wybranego przedsiębiorstwa produkcyjnego, dane przyjęte z literatury oraz dane wygenerowane losowo. Wyniki badań przeprowadzone na przygotowanych zestawach danych były zadawalające i nie przekroczyły przyjętej granicy odległości od wartości optymalnej lub referencyjnej.

W ostatnim rozdziale ocenianej dysertacji (rozdział 6) autor przedstawił podsumowanie i wnioski. Rozdział ten jest bardzo zwięzły (tylko 1,5 strony). W podsumowaniu Doktorant tylko pośrednio odniósł się do tezy i celów pracy. Brakuje szerszego omówienia wyników badań, a szczególnie odniesienia się do ograniczeń zaproponowanego rozwiązania.

W pracy brakuje podsumowania poszczególnych rozdziałów i odniesienia się do praktycznych możliwości wykorzystania wyników przeprowadzonych badań. Pomimo pewnych mankamentów należy podkreślić metodologiczno-implementacyjny zgodny z tytułem charakter opinowanej rozprawy, a także dobrze udokumentowane badania literaturowe. Należy podkreślić że Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień z obszaru algorytmów genetycznych i uczenia maszynowego, logiki rozmytej oraz budowy modeli symulacyjnych. Przedstawiona w rozdziale 4 implementacja zaproponowanych metod w informatycznym systemie wspomaganie decyzji,

umożliwiającym pracę w chmurze (model SaaS), świadczy również o wysokich kompetencjach doktoranta w zakresie projektowania i implementacji systemów informatycznych. Weryfikacja działania zaprojektowanego systemu wspomaganie decyzji oraz zaproponowana metodologia prowadzenia badań nie budzą zastrzeżeń.

### **3. Oryginalne osiągnięcia**

Po analizie treści i wyników badań przedstawionych w opiniowanej pracy doktorskiej można stwierdzić, że postawione cele badawcze zostały zrealizowane. W trakcie prowadzonych badań, Doktorant uzyskał szereg nowych rezultatów, do których należy zaliczyć:

1. Opracowanie unikatowego systemu wsparcia decyzyjnego w zakresie harmonogramowania produkcji w czasie rzeczywistym.
2. Unifikację koncepcji hiper-heurystyki z paradygmatem uczenia klasyfikatorów w środowisku złożonego systemu adaptacyjnego.
3. Budowę autorskiego algorytmu symulowanego hartowania.
4. Implementację algorytmu symulowanego hartowania w procesie uczenia maszynowego.
5. Zaproponowanie modyfikacji metody wysokości (HDM) opartej na ocenie stopnia aktywacji maksymalnego zbioru rozmytego.
6. Opracowanie i implementacja autorskiej metody krzyżowania i mutacji chromosomów.
7. Zastosowanie metody Michigan-Pittsburg dla potrzeb wyznaczenia chromosomów przeznaczonych do badań testowych uczenia maszynowego.

Podsumowując uważam, że uzyskane rezultaty potwierdzają wiedzę i kompetencje Doktoranta w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn w zakresie właściwego stosowania metod i narzędzi badawczych w obszarze harmonogramowania produkcji. Uzyskane wyniki weryfikują także umiejętności Doktoranta w zakresie praktycznego wykorzystania nowoczesnych metod sztucznej inteligencji. Przedstawione rezultaty potwierdzają realizację postawionych w rozprawie celów i wskazują, że Doktorant potrafi definiować i samodzielnie realizować zaplanowane zadania badawcze.

### **4. Uwagi do pracy doktorskiej**

Analiza opiniowanej pracy doktorskiej skłania do uwag natury ogólnej i szczegółowej.



### Uwagi ogólne:

1. Generalna uwaga, która nasuwa się po analizie prowadzonych badań związana jest ze złożonością badanego modelu, który składa się z dwóch maszyn i magazynu międzymaszynowego i możliwości użycia systemu w praktyce. **Czy zaproponowany system może wspomagać decyzje dotyczące harmonogramowania zadań w systemach o większej złożoności (złożonych np. z 3 maszyn i dwóch buforów, etc.)? Czy możliwe jest uwzględnienie wielkości partii i czasów przezbrojenia maszyny w proponowanym podejściu? Czy możliwe jest uwzględnienie poziomu niezawodności (dostępności) maszyny w proponowanym podejściu?**
2. Wiele operacji realizowanych w systemach produkcyjnych ma charakter niedeterministyczny. **Czy możliwa jest adaptacja systemu do harmonogramowania zleceń, których czasy realizacji są zadane w postaci rozkładu normalnego lub lognormalnego?**
3. W rozdziale 2 Autor zaznaczył, że jakość populacji początkowej może mieć istotny wpływ na jakość wyników osiąganych przez GA. **Czy zaproponowany system umożliwia wstępną analizę populacji początkowej lub wytypowanie osobników o lepszych cechach w celu uzyskania dobrej skuteczności algorytmu?**

### Uwagi szczegółowe

1. Analizę pracy utrudnia brak podsumowań poszczególnych rozdziałów.
2. Struktury językowe nie budzą poważniejszych zastrzeżeń.
3. Zamieszczone rysunki, tabele i diagramy, na ogół, dobrze ilustrują treści pracy jednak:
  - 3.1 Brak legend w pewnym stopniu utrudnia analizę wykresów i rysunków (rysunek 1, rysunek 2).
  - 3.2 Rysunek 4 jest zupełnie nieczytelny, a rysunek 7 jest mało czytelny.
  - 3.3 Kolejność rysunków 10 i 11 na stronie 23 została błędnie przedstawiona (rysunek 11 poprzedza 10).
  - 3.4 Rysunek 24 przedstawia przykładowy wykres najlepszych wyników dla dwóch uruchomień GA. Brakuje legendy lub opisu czym różniły się te dwa uruchomienia (prawdopodobnie populacją początkową).
  - 3.5 Rysunek 34 jest mało czytelny.
4. Tekst oraz język pracy nie budzą zastrzeżeń. W pracy wystąpiły nieliczne błędy:
  - 4.1 Strona 2 pracy jest pusta.

4.2 Strony 22 i 65 – pełna nazwa oprogramowania firmy Siemens to Tecnomatix Plant Simulation (brakuje numeru wersji).

5. W obliczeniach sumy czasów opóźnień na stronie 25 wystąpił błąd. Jest: „... termin realizacji zadania 3 został przekroczony o 80 jednostek czasu (termin wykonania – due date =opóźnienie;  $230-150=80$ ).”, powinno być: termin realizacji zadania 3 został przekroczony o 70 jednostek czasu, ponieważ z rysunku 11 wynika, że termin wykonania zadania 3 wynosi 220 a nie 230 jednostek. Błąd ten jest powielony dalej np. w tabeli 3 na stronie 30.

## 5. Konkluzja

Przytoczone uwagi krytyczne nie podważają ogólnie pozytywnej oceny opiniowanej pracy doktorskiej. Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie mgr inż. Bartosza Skobieja zostały zrealizowane oryginalne cele badawcze, polegające na zaprojektowaniu i implementacji symulacyjnego modelu komputerowego, realizującego zadany proces wytwórczy, zaprojektowanie i wykonanie agenta wsparcia decyzyjnego działającego w oparciu o system regułowy, opracowanie algorytmu uczenia maszynowego tego systemu w oparciu o algorytm genetyczny, integracja i weryfikacja działania elementów opracowanego narzędzia badawczego. Doktorant wykazał się dobrą znajomością metod i narzędzi związanych z zastosowaniem algorytmów genetycznych, logiki rozmytej oraz symulacji komputerowej dla potrzeb harmonogramowania produkcji.

**Uważam, że opiniowana praca spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach i tytule naukowym w odniesieniu do rozpraw doktorskich (Dz. U. Nr 65 z dnia 14 marca 2003) w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (dziedzina nauk technicznych) i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Stawomir Klon