

Dr hab. inż. Arkadiusz Gola, prof. uczelni
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Informatyzacji i Robotyzacji Produkcji
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin

Lublin, 14.05.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Musiała

pt.: „**Metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich z wykorzystaniem metaheurystyk**”

(recenzja wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna – prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego nr W10/RDND07/15/2023 z dnia 14 marca 2023).

1. Obszar problemowy rozprawy – ocena celowości podjęcia tematu pracy

Problematyka harmonogramowania produkcji stanowi jeden z kluczowych obszarów decyzyjnych w obszarze planowania operacyjnego. Mimo, iż jest ona przedmiotem badań od wielu lat, nadal (ze względu na NP.-trudny charakter zadań optymalizacyjnych w tym zakresie) należy do aktualnych problemów badawczych. Jest to konsekwencją tego, iż dynamiczne środowisko realizacji procesów produkcyjnych nakłada konieczność poszukiwania rozwiązań umożliwiających generowanie optymalnych harmonogramów produkcji w krótkim czasie, dających możliwość reharmonogramowania wszystkich zadań produkcyjnych w przypadku pojawienia się nieprzewidywanych sytuacji w trakcie realizacji procesu (np. awaria maszyny, wydłużenie czasu realizacji zadania, itp.). Renesans prac badawczych w problematyce szeregowania zadań nastąpił wraz z powstaniem algorytmów inteligentnych, umożliwiających znalezienie rozwiązań bliskich rozwiązaniom optymalnym w czasie znacząco krótszym w stosunku do klasycznych metod optymalizacyjnych (określanych metodami dokładnymi). Od tego momentu wielu badaczy podejmuje próby opracowania metod i metodyk umożliwiających generowanie harmonogramów dla różnych klas systemów produkcyjnych zbliżonych do rozwiązań optymalnych (wg różnych kryteriów i z uwzględnieniem zróżnicowanych ograniczeń) w czasie akceptowalnym z punktu widzenia możliwości efektywnej realizacji procesów wytwórczych.

W ocenianej pracy Autor podjął się zadania opracowania metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych. Temat ten wpisuje się zatem w aktualne trendy badawcze. Jest również o tyle istotny, że podejmuje problematykę szeregowania zadań ukierunkowaną na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich – co jest podejściem ważnym zarówno ze względu na kluczowy charakter niniejszego zasobu, jak również zwiększoną złożoność problematyki optymalizacyjnej (występuje tu obok typowego przydziału zadań do stanowisk roboczych również zagadnienie przydziału pracowników o odpowiednich umiejętnościach do realizacji poszczególnych zadań).

Podsumowując można więc stwierdzić, iż podjęta przez Autora tematyka jest ważna i wpisuje się w bieżące potrzeby i trendy badawcze, a opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości zastosowania niniejszego rozwiązania w warunkach przemysłowych.

2. Ocena struktury i zakresu pracy

2.1. Zakres i struktura pracy

Opiniowana praca liczy 152 strony i składa się ze streszczeń (w języku polskim i angielskim), wstępu, 8 rozdziałów, podsumowania, wniosków i kierunków dalszych prac (oznaczonych jako rozdział 9), spisu bibliografii, spisu tabel i spisu rysunków.

We wstępie zaprezentowano wyniki przeglądu literatury z zakresu objętego tematyką pracy oraz przedstawiono zakres treści zawartych w kolejnych rozdziałach pracy.

W rozdziale pierwszym przedstawiono charakterystykę współczesnych systemów produkcyjnych a także omówiono problematykę planowania produkcji i rodzaje sterowania procesami produkcyjnymi. W ramach rozdziału zawarto również wyniki przeprowadzonego przeglądu literatury przedmiotu w zakresie problemów występujących przy budowie harmonogramów produkcji oraz przedstawiono kryteria określające jakość harmonogramów.

Rozdział drugi (mający również charakter teoretyczny) został poświęcony przeglądowi literatury w zakresie metod inteligentnych oraz ich zastosowania w inżynierii produkcji. Przedstawiono w nim klasyfikacje metod inteligentnych wykorzystywanych w zagadnieniach planowania produkcji oraz dokonano ich porównania ze względu na wybrane kryteria przyjęte na potrzeby realizacji celu pracy.

Rozdział trzeci został poświęcony przedstawieniu celu, tezy i przyjętych założeń badawczych. W szczególności przedstawiono w nim przyjęte zadania badawcze oraz założenia dla opracowywanej metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich.

W rozdziale czwartym zaprezentowano autorską, 6-cio etapową metodykę harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Każdy z etapów opisano pod kątem działań, które należy wykonać, aby możliwe było wdrożenie metodyki w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Rozdział piąty zawiera opis matematyczny algorytmu optymalizacyjnego zastosowanego w opracowanej metodyce. Ponadto przedstawiono w nim wyniki testów komputerowych działania niniejszego algorytmu.

W rozdziale szóstym zamieszczono charakterystykę systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa Brose Sitech sp. z o.o., który stanowił przedmiot weryfikacji opracowanej metodyki harmonogramowania produkcji. W szczególności zawarto w nim informacje dotyczące layout'u hal produkcyjnych, wykorzystywanych maszyn, procesów technologicznych a także dane dotyczące marszrut produkcyjnych, buforów przystanowiskowych oraz obecnie stosowanych metod przydziału

Rozdział szósty pracy został poświęcony weryfikacji opracowanej metodyki. Dla potrzeb weryfikacji wykorzystano grupę wyrobów DOPEL wykonywanych przez przedsiębiorstwo Brose Sitech sp. z o.o. dla firmy Volkswagen.

W rozdziale ósmym zamieszczono opis aplikacji wspierającej generowanie harmonogramów i wykorzystującą algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search (NTS). Zaprezentowano i omówiono w nim poszczególne widoki aplikacji oraz przykłady.

Rozdział 9 obejmuje swoim zakresem podsumowanie oraz wnioski z zastosowania oraz weryfikacji metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Odniesiono się w nim do podstawowych tez pracy oraz określono kierunki dalszych prac badawczych.

W końcowej części pracy zamieszczono spis bibliografii zawierający 177 pozycji polsko- i anglojęzycznych (w tym 11 artykułów współautorstwa Autora pracy), spis tabel oraz spis rysunków.

2.2. Uwagi dotyczące struktury pracy

Układ i struktura pracy są właściwe a kolejne rozdziały stanowią logiczną całość. Zasadniczo pracę podzielono na trzy części: teoretyczną, projektową i eksperymentalną. W części teoretycznej (obejmującej rozdziały 1 i 2) przeprowadzono analizę literatury w zakresie problematyki harmonogramowania produkcji oraz metod inteligentnych wykorzystywanych do rozwiązywania problemów o znacznej złożoności obliczeniowej. Część projektowa (rozdziały 4 i 5) zawiera prezentację opracowanej metodyki harmonogramowania oraz szczegółowy opis algorytmu optymalizacyjnego Neuro-Tabu Search. Rozdziały 6-7 obejmują swoim zakresem prezentację procesu produkcyjnego struktur siedzeń samochodowych realizowanego w przedsiębiorstwie Brose Sitech sp. z o.o. oraz weryfikację opracowanej metodyki, zrealizowaną w na podstawie danych z ww. przedsiębiorstwa. Dopelnienie pracy stanowi opis aplikacji wspierającej generowanie harmonogramów, w której zaimplementowano opracowany algorytm optymalizacyjny. Pracę kończą wnioski oraz podsumowanie zrealizowanych prac badawczych. Taki sposób przedstawienia treści nie budzi żadnych zastrzeżeń (układ pracy stanowi logiczną i przejrzystą strukturę, zwiększającą czytelność pracy oraz umożliwiającą zrozumienie kolejnych etapów realizacji zdefiniowanego celu). Pewien niedosyt budzi tylko brak syntetycznego spisu skrótów i oznaczeń wykorzystanych w pracy, który mógłby stanowić ułatwienie w interpretacji zawartych w pracy formuł matematycznych.

3. Ocena oryginalności i wartość merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena merytoryczna rozprawy

Oceniana rozprawa ma charakter projektowy, a jej głównym celem (zdefiniowanym w punkcie 3) jest *„opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych z uwzględnieniem takich kryteriów optymalizacyjnych jak minimalna liczba pracowników lub minimalny czas realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem kompetencji pracowników”*. Jako etapy wyznaczające etapy prac niezbędne do realizacji celu głównego przyjęto trzy cele szczegółowe, tj.:

1. Opracowanie algorytmu optymalizacyjnego Neuro-Tabu Search, który zostanie wykorzystany w metodyce harmonogramowania produkcji w kontekście minimalizacji czasu realizacji zadań produkcyjnych.

2. Opracowanie poszczególnych etapów metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich.
3. Weryfikację metodyki w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Praca niewątpliwie wpisuje się w obszar badawczy „organizacja i zarządzanie produkcją, usługami i przedsiębiorstwem” zdefiniowanego przez Komitet Inżynierii Produkcji Polskiej Akademii Nauk jako obszar zainteresowań *Inżynierii produkcji* (wchodzącej obecnie w skład dyscypliny naukowej *Inżynieria mechaniczna*).

Od strony merytorycznej pracę oceniam w sposób pozytywny. Autor w sposób prawidłowy zidentyfikował lukę badawczą oraz opracował oryginalne rozwiązanie umożliwiające szeregowanie zadań z jednoczesną optymalizacją wykorzystania zasobów ludzkich dedykowanych do realizacji określonych zleceń produkcyjnych. Mimo, iż weryfikacja opracowanej metodyki została zrealizowana na podstawie danych z jednego systemu produkcyjnego – prezentowane w pracy rozwiązanie ma charakter uniwersalny i może być stosunkowo łatwo zaadoptowana dla potrzeb innych przedsiębiorstw wytwórczych.

3.2. Ocena oryginalności pracy

Opracowana w ramach pracy doktorskiej metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich z wykorzystaniem metaheurystyk jest rozwiązaniem nowym. Oryginalnym elementem pracy jest zaproponowane połączenie znanego w literaturze algorytmu Tabu-Search z jednowarstwową, samoorganizującą się siecią neuronową, której celem jest usprawnienie mechanizmu zabronień wykorzystywanego przez ww. algorytm. Ważnym elementem pracy jest również przedstawione narzędzie (aplikacja), wspomagająca proces przydziału pracowników do realizacji zadań produkcyjnych zgodnie z założeniami opracowanej metodyki.

3.3. Uwagi krytyczne

Mimo, iż w ogólnej ocenie praca została przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym, Autor pracy nie ustrzegł się pewnych błędów, do których należy zaliczyć:

- Analiza literatury oparta na „odległych czasowo” publikacjach (analiza literatury – choć przeprowadzona w sposób prawidłowy bazuje w zdecydowanej większości na artykułach publikowanych do roku 2019).
- Błędne stosowanie pojęcia „program produkcyjny” (w niniejszej pracy Autor stosuje go jako zamiennik pojęcia „sposób produkcyjny”, co nie jest prawdą – zgodnie z literaturą

przedmiotu program produkcyjny oznacza bowiem liczbę wyrobów wykonywanych w jednostce czasu, najczęściej roku).

- W pracy Autor posługuje się sformułowaniem „systemy pchające”. Choć nie jest to stwierdzenie błędne (jest ono bowiem tłumaczeniem angielskiego słowa „pull systems” – to w literaturze polskojęzycznej – w odniesieniu do tej klasy systemów stosuje się raczej sformułowanie – „systemy tłoczące”).
- Problem badawczy przedstawiony na stronie 51 nie został sformułowany poprawnie. *De facto* jest to bardziej cel planowanych do realizacji prac badawczych aniżeli problem czy też luka badawcza.
- W pracy Autor wskazuje, iż opracowana metodyka harmonogramowania umożliwia optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich z uwzględnieniem kompetencji pracowników. Analizując opracowane rozwiązanie należy stwierdzić, iż sformułowanie „kompetencje pracowników” jest tu stosowane na wyrost – bowiem w procesie harmonogramowania nie są brane pod uwagę kompetencje pracowników a wyłącznie zaszeregowanie danego pracownika do kategorii „spawacz” lub „operator”.
- W przypadku rysunku 4.2 nie wskazano źródła jego pochodzenia (a jest to rysunek często spotykany w literaturze przedmiotu).
- W tabeli 5.3 nie podano jednostek miary wskazanych wyników.

Ponadto lektura treści pracy skłania do sformułowania następujących pytań i uwag o charakterze dyskusyjnym lub wymagających dodatkowych wyjaśnień:

1. Na stronie 9 zawarto stwierdzenie, iż „*Budowa harmonogramu produkcji polega na zaplanowaniu przebiegu operacji wytwórczych w czasie, czyli przyporządkowaniu w czasie dysponowanych zasobów produkcyjnych do zadań określonych przez zlecenia produkcyjne, oczywiście przy spełnieniu przyjętych ograniczeń*”. Stwierdzenie to wydaje pewnym nie do końca prawdziwym uogólnieniem – bowiem w klasycznym procesie harmonogramowania to zadania (operacje) przyporządkowywane są do zasobów (maszyn; stanowisk roboczych) którymi dysponuje przedsiębiorstwo, a dopiero w kolejnym kroku następuje (choć nie zawsze) przyporządkowanie pracowników do realizacji konkretnych zadań na konkretnych stanowiskach.
2. Na stronie 10 zawarto stwierdzenie: „*Przykładowo optymalizacja kolejności przebrojeń maszyn zmniejszająca czas pracy o 0.1 procent może przelożyć się na tysiące bądź miliony*”

złoty oszczędności w skali roku". Tego typu teza powinna być potwierdzona badaniami lub odnośnikiem do wyników badań potwierdzających jej słusność.

3. Na stronie 23, jako jedną z cech wspólnych dla problemów dotyczących budowy i optymalizacji harmonogramów wskazano *„liczba operacji technologicznych jest różna i większa od liczby stanowisk roboczych; w rzeczywistych systemach produkcyjnych stanowiska robocze mają charakter wielofunkcyjny i można wykonywać na nich wiele operacji”*. W kontekście tym pojawia się pytanie – czy tego typu stwierdzenie jest zawsze słuszne? Wydaje się bowiem, iż choć w praktyce przemysłowej zastosowanie znajduje coraz więcej obrabiarek wielozadaniowych to nadal spotkać się można z procesami technologicznymi, w trakcie których każda z operacji wykonywana jest na innym stanowisku roboczym”.
4. W tabeli 2.2 zawarto klasyfikację wybranych algorytmów klasyfikując je wg. czterech kryteriów, tj. „wykorzystanie”, „możliwość zastosowania”, „dokładność wyników” i „trudność implementacji”. Brakuje jednak wyjaśnienia na jakiej podstawie została kategoryzacja poszczególnych metod w ramach ww. kryteriów (tj. na jakiej podstawie określano wartości „mała”, „średnia”, „duża”).
5. Na stronie 59 wskazano, iż *„Do danych na temat procesu produkcyjnego należy m.in. layout”*. Nasuwa się tu pytanie: „Co Autor miał w tym przypadku na myśli?” (layout stanowi raczej dane o systemie aniżeli o procesie produkcyjnym).
6. Charakteryzując etap 3 metodyki (s. 60) zawarto stwierdzenie *„Analiza zebranych w etapie 2 metodyki danych na temat procesu produkcyjnego pokazuje, że istnieje taka wartość wydajności produkcyjnej, po osiągnięciu której zwiększenie liczby pracowników nie wpływa znacząco na zwiększenie wydajności produkcji, natomiast znacząco zwiększa koszty produkcji”*. Analizując opis Etapu 2 trudno jest znaleźć potwierdzenie niniejszego stwierdzenia. Dlatego też bardzo proszę o komentarz w tej sprawie.
7. Zakwalifikowanie „weryfikacji i oceny otrzymanego harmonogramu produkcji” jako etapu metodyki nie wydaje się właściwe. Metodyka z założenia powinna wygenerować rozwiązanie optymalne lub zbliżone do optymalnego bez konieczności jego każdorazowej weryfikacji poprzez porównanie z rozwiązaniami otrzymanymi metodami tradycyjnymi (w warunkach przemysłowych tego typu podejście było by niemożliwe do realizacji i znacząco skomplikowało by sam proces harmonogramowania).
8. Opisując algorytm Neuro-Tabu Search (s. 64) Autor zawarł tezę, iż *„zastosowanie klasycznego podejścia w postaci listy zabronień, na których pamiętane są zabronione relacje kolejnościowe pomiędzy zadaniami jest zbyt restrykcyjne dla rozważanego*

problemu i znacząco ogranicza zbiór niezabronionych rozwiązań sąsiednich w sąsiedztwie rozwiązań bazowych". W związku z powyższym pojawia się pytanie: Na jakiej podstawie stwierdzono, iż klasyczny mechanizm zabronień stosowany w algorytmie Neuro-Tabu Search jest „zbyt restrykcyjny” i w jaki sposób redukuje on efektywność procesu harmonogramowania?

9. W ramach opracowanej metodyki zastosowano prostą (jednowarstwową) sieć neuronową. Brakuje jednak uzasadnienia – dlaczego akurat taka struktura sieci została wybrana? Czy taka struktura sieci jest optymalna z punktu widzenia efektywności opracowanego rozwiązania?
10. Na stronach 96-97, wyszczególniono dane i informacje wykorzystywane obecnie w procesie przydziału pracowników do realizacji zadań. Biorąc pod uwagę ich wpływ na możliwość realizacji procesu produkcyjnego (np. dostępność części z tłoczni, stan obciążenia lakierni) pojawia się pytanie: Czy wszystkie z tych czynników są brane również pod uwagę w trakcie harmonogramowania produkcji z wykorzystaniem opracowanej metodyki?
11. W ramach identyfikacji zasobów krytycznych (s. 100) Autor zawarł stwierdzenie, iż *„Wyniki analiz pokazują, że zasobami ograniczającymi przebieg procesu produkcyjnego są zasoby ludzkie”*. W pracy nie zawarto jednakże żadnych danych potwierdzających tą tezę. W związku z powyższym należy zadać pytanie: *„Na jakiej podstawie i w jaki sposób można ustalić, że zasoby ludzkie są zasobem krytycznym w organizacji?”*.
12. W tabeli 7.6 przedstawiono odchylenia względnie czasu realizacji zadań. Nie wskazano jednak wartości bazowej, w stosunku do której były liczone niniejsze odchylenia.
13. Zgodnie z założeniami opracowanej metodyki algorytm umożliwia generowanie „dużej liczby wariantów”, które jak twierdzi Autor „ułatwią zarządzającym podejmować decyzje odnośnie sposobu realizacji planu produkcji i da możliwość racjonalnego zarządzania pracownikami (s. 112). Tego typu podejście wydaje się błędne – w warunkach przemysłowych decydent oczekuje bowiem jednego, najlepszego rozwiązania, nie zaś zbioru rozwiązań, które wymagają dodatkowej analizy. Bardzo proszę o komentarz w tej sprawie (uzasadnienie zaproponowanego w pracy podejścia).
14. Przedstawiona w pracy aplikacja wspierająca generowanie harmonogramów – kalkulator Sitech (rozdział 8) umożliwia wygenerowanie harmonogramu dla 27 zadań. Pojawia się więc pytanie – czy korzystając z tego narzędzia jest możliwość wygenerowania harmonogramów dla innej (różnej) liczby zadań, pracowników, stanowisk (tj. na ile uniwersalna jest ta aplikacja)?

3.4. Uwagi szczegółowe

Strona estetyczna pracy stanowi zdecydowanie jej mocną stroną. Praca została przygotowana bardzo starannie, a prezentowane treści ilustrowane są umiejętnie rysunkami, tabelami i wykresami – co znacznie zwiększa przejrzystość i ułatwia czytanie pracy. Autor posługuje się językiem właściwym dla prac naukowych (jedynym zastrzeżeniem w tym zakresie jest stosowanie w niektórych miejscach formy osobowej, np. „...*dochodzimy do wniosku...*” – s. 75, „...*wyznaczamy ze wzoru...*” – s. 95, „*przyjmujemy*” – s. 106, co raczej nie powinno mieć miejsca w tego typu opracowaniach). Pojawiające się w pracy błędy o charakterze stylistycznym i edytorskim mają charakter bardzo sporadyczny a ich przykładami są np.:

- błędy stylistyczne i gramatyczne:
 - s. 10 – „*Złożoność zadań harmonogramowania wymusza potrzebę budowania cząstkowych modeli optymalizacyjnych dla określonych fragmentów produkcji*”,
 - s. 19 – „*...o najmniejszej wartości kryterium celu...*”,
 - s. 51 – „*najmniejszego czasu...*”,
 - s. 56 – „*Określenie poziomu analizy...*”,
- błędy o charakterze edytorskim:
 - s. 23 – jest: „*... maja...*”, powinno być: „*...mają...*”,
 - s. 56 – jest: „*... produkcyjno-administracyjnej...*”, powinno być: „*...produkcyjno-administracyjnej...*”,
 - s. 85 - jest: „*... LL*”, powinno być: „*RL*”,

Ponadto w niektórych miejscach brakuje lub podwójnie zastosowano znaki interpunkcyjne (przecinki, kropki) oraz nie usunięto tzw. „sierot” na końcach wierszy. Autor także stosuje też czasami pewne uogólnienia (np. „*Blacha dostarczana jest ... kilka razy w tygodniu*” – s. 79) oraz tzw. kolokwializmy – np. s. 81 „*... produkty nakładane i ściągane sq...*”, itp.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę całokształt ocenianej pracy stwierdzam, iż recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Musiała stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę Kandydata w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” oraz umiejętność

samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Jako oryginalne rozwiązanie problemu naukowego uznaję opracowany algorytm szeregowania zadań produkcyjnych, stanowiący połączenie metody Tabu-Search z jednowarstwową, samoorganizującą się siecią neuronową.

Po zapoznaniu się z treścią pracy stwierdzam, iż Doktorant wykazał się znajomością podstawowej literatury przedmiotu rozprawy, umiejętnością praktycznego wykorzystania dotychczasowych zdobyczy nauki dla potrzeb rozwiązania realnych problemów z obszaru inżynierii produkcji. Zauważone w rozprawie doktorskiej nieprawidłowości oraz wskazane w punktach 3.3 i 3.4 uwagi nie mają zasadniczego znaczenia dla wartości merytorycznej pracy, odpowiadającej współczesnemu standardowi prac doktorskich. Dlatego też rozprawa w całości może być oceniona pozytywnie.

Konkludując uważam, że opiniowana praca spełnia warunki stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 *o stopniach i tytule naukowym* (Dz.U. z 2017, poz. 1789 ze zm.) w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

