

**dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT**  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
70-310 Szczecin  
Al. Piastów 19

Szczecin 25.08.2023



## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Rewers**

**pt. „Metodyka poziomowania produkcji w kontekście rotacji zapasów oraz  
dostępności wyrobów gotowych”**

*Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekania Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, dr hab. inż. prof. PP Olafa Ciszaka z dnia 03.07.2023 r. o powołaniu przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej na recenzenta pracy doktorskiej mgr. inż. Pauliny Rewers zatytułowanej „Metodyka poziomowania produkcji w kontekście rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Adam Hamrol.*

### **1. Ocena wyboru tematu rozprawy**

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji, pozwalającej na zaspokojenie zmiennego zapotrzebowania na wyroby i spełniającej określone kryteria poziomowania. Doktorantka postawiła sobie zadanie opracowania metodyki, która pozwoli na uzyskanie równomiernego przepływu wyrobów z uwzględnieniem zmiennego popytu generowanego przez klientów. Celem użytkowym pracy jest opracowanie takiej metodyki, która umożliwi zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zmniejszeniu dostępności wyrobów gotowych w porównaniu do bazowego sposobu planowania i harmonogramowania produkcji.

Temat pracy jest bardzo aktualny i poruszany w pracach badawczych wielu ośrodków naukowych na świecie. Obejmuje on bardzo ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia zagadnienie eksploatacji maszyn i urządzeń w zakładach przemysłowych. Cechą szczególną pracy jest jej zorientowanie na problemy praktyczne związane z zapewnieniem odpowiedniej dostępności wyrobów gotowych oraz odpowiedniej rotacji zasobów w

magazynie wyrobów gotowych. Identyfikacja przyczyn zmienności wielkości zapasów w magazynie wyrobów gotowych ma ogromne znaczenie dla efektywnej pracy przedsiębiorstwa i zapewnienia ciągłości jego produkcji. Z naukowego punktu widzenia wymaga prawidłowego wykorzystania nowoczesnych metod wnioskowania statystycznego, statystyki opisowej oraz badań symulacyjnych. Oceniając wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Rewers należy stwierdzić, że jest on trafny i uzasadniony zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

## **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Rewers składa się ze spisu ważniejszych oznaczeń, streszczenia, wprowadzenia, sześciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono wyniki prawidłowo zrealizowanego przeglądu literatury. Z uwagi na sformułowany problem badawczy skupiono się na obszarze planowania i harmonogramowania produkcji ze szczególnym uwzględnieniem problemu poziomowania procesów produkcyjnych. Stwierdzono, iż głównym celem poziomowania procesu produkcyjnego jest jego równoważenie poprzez opracowanie sekwencyjnego harmonogramu pozwalającego na niwelowanie nagłych wzrostów zapotrzebowania. Zidentyfikowano też takie dodatkowe cele poziomowania produkcji jak równoważenie obciążenia stanowisk, redukcję zapasów w procesie produkcyjnym, zmniejszenie kosztów magazynowania oraz zwiększenie wykorzystania zasobów. Jako najważniejsze metody stosowane w procesie poziomowania produkcji wskazano analizę ABC/XYZ, opracowanie macierzy podobieństwa technologicznego wyrobów, wyznaczenie wskaźnika EPEI (ang. Every Part Every Interval) dla procesu oraz wyznaczenie wielkości zapasów w magazynie. Przegląd literatury kończy się wnioskami, w których autorka stwierdza, iż istotnym problemem podczas poziomowania procesu produkcyjnego jest duży stopień ogólności proponowanych metod oraz występowanie różnych sposobów ich implementacji. Prawidłowo wskazano też, iż w przypadku zastosowania metodyki Bohnena występuje konieczność przeprowadzenia rozbudowanych obliczeń matematycznych, co dla przedsiębiorstw produkcyjnych może okazać się zbyt trudne i kosztowne. W związku z tym jest potrzeba opracowania prostego sposobu poziomowania produkcji, który będzie można zastosować w warunkach produkcyjnych.

Drugi rozdział poświęcony został przedstawieniu celu, tezy oraz zakresu pracy. Jako cel pracy przyjęto opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji dostosowanej do potrzeb i możliwości przedsiębiorstw nie stosujących w planowaniu zaawansowanych, dedykowanych do planowania, programów komputerowych. Sformułowano też poprawnie tezę pracy. Stwierdzono, iż planowana do opracowania metodyka poziomowania produkcji (MPP) umożliwi zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów gotowych w porównaniu do bazowego sposobu planowania i harmonogramowania produkcji. Należy zwrócić w tym miejscu uwagę, iż przy formułowaniu tezy odwołano się do niejednoznacznego pojęcia „bazowy sposób planowania i harmonogramowania produkcji”. Wprawdzie w dalszej części pracy podjęto próbę zdefiniowania tego pojęcia, lecz dla oceny istotności postawionej tezy zasadne byłoby precyzyjne zdefiniowanie tego pojęcia już w rozdziale drugim przy formułowaniu tezy pracy doktorskiej. W rozdziale drugim przedstawiono też zastosowane metody badawcze. W celu stwierdzenia statystycznie istotnej różnicy w rozkładach wskaźników dla produkcji bazowej i produkcji poziomowanej zastosowano wnioskowanie statystyczne w postaci testu kolejności par Wilcoxona, średniego wskaźnika rotacji zapasów oraz wskaźnika realizacji zamówień. Zastosowano też statystykę opisową w postaci wyznaczenia wskaźnika położenia (średnia arytmetyczna, mediana, kwartył) oraz wskaźnika zróżnicowania (odchylenie standardowe, współczynnik zmienności). W celu sprawdzenia skuteczności opracowanej metodyki zaproponowano zastosowanie badań symulacyjnych z wykorzystaniem programu FlexSim. Podejście takie jest jak najbardziej uzasadnione, ponieważ pozwala na przeprowadzenie wielu eksperymentów badawczych z wykorzystaniem wirtualnych modeli symulacyjnych. W celu oceny możliwości implementacyjnych opracowanej metodyki zastosowano badania ankietowe. Badania te miały bardzo ograniczony charakter, ponieważ oparto je na analizie odpowiedzi udzielonych przez tylko trzy osoby (planistę, kierownika produkcji i pracownika naukowo dydaktycznego).

W ramach trzeciego rozdziału przedstawiono opracowaną metodykę poziomowania produkcji. Przedstawiono ideę procesu poziomowania produkcji (rys. 3.1) oraz opisano najważniejsze przyjęte założenia. Niektóre sformułowania w tym rozdziale są niejednoznaczne. Na przykład nie wyjaśniono, dlaczego przyjęto założenie, że „poziomowanie dąży do tego, aby wyroby produkowane były [...] w partiach o jak najmniejszej liczbie sztuk”. Nieprecyzyjny jest też podział produkowanych wyrobów na „wyroby finalne” oraz „części oryginalne”. Przy czym części oryginalne zdefiniowano jako „części, które wytwarzane są w zakresie działalności

przedsiębiorstwa produkcyjnego”. Ogólny schemat opracowanej metodyki zamieszczony został w rozdziale 3.5. Szczegółowo opisano etap podziału wyrobów na grupy, etap podziału wyrobów na rodziny, wyznaczanie czasów uzupełniania zapasów w magazynie, wyznaczanie wielkości zapasów, opracowanie wariantów harmonogramów produkcji oraz wybór harmonogramu produkcji. W opisie etapu 5 (opracowanie wariantów harmonogramów produkcji) widoczny jest brak wyjaśnienia powodów przyjęcia reguł „najpierw najdłuższy czas operacyjny” i „najpierw najkrótszy czas operacyjny”. Lakoniczna informacja o tym, iż obie te reguły „pozwalają na osiągnięcie minimalnych wartości wskaźnika  $C_{max}$ ” jest niepoprawna, ponieważ powyższe reguły nie gwarantują uzyskania uszeregowania o minimalnej wartości wskaźnika  $C_{max}$ . Nawet jeżeli zastosowanie reguły „najpierw najkrótszy czas operacyjny” pozwoliłoby na przypadkowe uzyskanie minimalnego wskaźnika  $C_{max}$ , to zastosowanie reguły „najpierw najdłuższy czas operacyjny” nie pozwoliłoby na uzyskanie takiego samego wyniku.

W rozdziale czwartym prawidłowo przedstawiono wyniki eksperymentów symulacyjnych przeprowadzonych w celu weryfikacji opracowanej metodyki poziomowania produkcji. Rozdział ten jest bardzo ciekawy i zawiera dużo danych uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych. Na 100 przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, w 57 przypadkach uzyskano niższy wskaźnik rotacji zapasów, a w 95 przypadkach uzyskano wyższy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas w porównaniu z produkcją bazową. W celu potwierdzenia istnienia statystycznie istotnej różnicy w rozkładach współczynników zastosowany został test kolejności par Wilcoxa średniego wskaźnika rotacji zapasów oraz wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas. Przeprowadzone badania potwierdziły, że średnio wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej jest istotnie wyższy od wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej.

W ramach rozdziału piątego przedstawiono weryfikację skuteczności opracowanej metodyki poziomowania produkcji. Badania weryfikacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem metody symulacji komputerowej. Nie wyjaśniono, dlaczego w pracy doktorskiej badania te nazwano „w warunkach produkcyjnych”. Do badań symulacyjnych wybrano procesy produkcyjne z przedsiębiorstwa produkcyjnego, w którym wyroby gotowe są montowane na indywidualne zamówienie klienta. W pracy brak jest bliższych danych o analizowanym procesie produkcyjnym. Nie przedstawiono mapy procesu produkcyjnego ani marszrut technologicznych poszczególnych rodzajów wyrobów. Wskazano tylko, iż na wydziale 1

pracuje 8 maszyn technologicznie podobnych, a na wydziale 2 pracuje 12 maszyn. Na rys. 5.2 przedstawiono ogólny widok modelu symulacyjnego procesu realizowanego na wydziale nr 2. Rysunek ten jest jednak tak mały, że przedstawiony model jest całkowicie nieczytelny. Brak jest modelu procesu produkcyjnego realizowanego na wydziale 1. Przeprowadzone badania podsumowano na końcu rozdziału. Wskazano, iż produkcja poziomowana według zaproponowanej metodyki pozwala na uzyskanie lepszego wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas w stosunku do produkcji realizowanej bez stosowania tej metodyki. Udało się też poprawić wskaźnik rotacji zapasów dla obu wydziałów.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki ankiety przeprowadzonej w celu oceny opracowanej metodyki poziomowania produkcji. Jako cel tych badań podano sprawdzenie, czy opracowana metodyka jest „wykonalna” oraz czy „uzyskane wyniki są zbieżne”. W pracy doktorskiej brak jest jednak precyzyjnej informacji o sposobie potwierdzenia wykonalności metodyki oraz o sposobie potwierdzenia zbieżności uzyskiwanych wyników za pomocą badań ankietowych. Nie wyjaśniono też, czy przyjęta grupa ankietowanych osób jest grupą reprezentatywną. W badaniach ankietowych wzięły udział tylko trzy osoby, które (jak wskazano w pracy) miały wiedzę na temat planowania produkcji. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż osoby realizujące proces poziomowania uzyskały dokładnie takie same wyniki i wyniki te były zgodne z wynikami wzorcowymi.

W rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie oraz sformułowano wnioski. Wnioski podzielono na wnioski z analizy literatury oraz wnioski dotyczące osiągnięcia celów pracy. Prawidłowo stwierdzono, że cel pracy został osiągnięty. Opracowano autorską metodykę poziomowania produkcji w warunkach zmiennego zapotrzebowania na produkowane wyroby. Potwierdzono też lepszą efektywność tej metodyki w porównaniu do procesu planowania realizowanego dotychczas w przykładowym przedsiębiorstwie produkcyjnym.

### **3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Problem badawczy został określony prawidłowo, lecz niezbyt precyzyjnie. Stwierdzono, iż „wskazane jest opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji, zaspokajającej zmienne zapotrzebowanie na wyroby, spełniającej określone kryteria poziomowania, dostosowanej do potrzeb i możliwości przedsiębiorstw nie stosujących w planowaniu zaawansowanych, dedykowanych do planowania, programów komputerowych”. Nie określono jednoznacznie kryteriów, jakie powinna spełniać

planowana do opracowania metodyka oraz nie wskazano barier, jakie trzeba będzie pokonać w celu opracowania takiej metodyki. Nie wyjaśniono też powodów, dla których zdecydowano się opracować metodykę planowania produkcji dla przedsiębiorstw, które „nie stosują dedykowanych do planowania programów komputerowych”. Rozwój metod informatycznych, sztucznej inteligencji i komputerowego przetwarzania danych w naturalny sposób będzie wymuszał stosowanie komputerowych systemów obliczeniowych, które będą w stanie wspomagać zadania planowania i harmonogramowania produkcji.

2. W rozdziale drugim sformułowano prawidłowo tezę pracy „planowana do opracowania metodyka poziomowania produkcji (MPP) **umożliwi zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów gotowych w porównaniu do bazowego sposobu planowania i harmonogramowania produkcji**”. Zaproponowana teza została potwierdzona. Wyniki badań potwierdziły, iż opracowana metodyka poziomowania produkcji umożliwia zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów. Zastosowanie opracowanej metodyki pozwoliło na osiągnięcie statystycznie istotnie lepszych parametrów opisujących dostępność wyrobów gotowych w porównaniu z produkcją realizowaną w sposób dotychczasowy. Należy zwrócić jednak w tym miejscu uwagę, iż przyjęcie takiego porównania nie pozwala w sposób jednoznaczny ocenić efektywności opracowanej metodyki planowania produkcji. W przypadku innego przedsiębiorstwa, zastosowanie opracowanej metodyki może wygenerować zupełnie inne wyniki.
3. W rozdziale drugim przedstawiono też zastosowane metody badawcze. Wymieniono badania literatury, badania symulacyjne, badania statystyczne oraz badania ankietowe. W celu sprawdzenia skuteczności opracowanej metodyki zaproponowano zastosowanie badań symulacyjnych z wykorzystaniem programu FlexSim. Podejście takie jest jak najbardziej uzasadnione, ponieważ pozwala na przeprowadzenie wielu eksperymentów badawczych z wykorzystaniem wirtualnych modeli symulacyjnych. Natomiast badania ankietowe miały bardzo ograniczony charakter, ponieważ oparto je na analizie odpowiedzi udzielonych przez tylko trzy osoby (planistę, kierownika produkcji i pracownika naukowo dydaktycznego). Z tego też powodu do wyników tych badań należy pojąć w sposób bardzo ostrożny.

4. W rozdziale trzecim przedstawiono ideę poziomowania produkcji. Opis nie jest precyzyjny. Nie wyjaśniono, dlaczego przyjęto założenie, że „poziomowanie dąży do tego, aby wyroby produkowane były [...] w partiach o jak najmniejszej liczbie sztuk” (str. 44). Jeżeli takie stwierdzenie byłoby prawdziwe, to wystarczyłoby zaplanować produkcję w partiach liczących 1 sztukę.
5. Opis opracowanej metodyki poziomowania produkcji zawiera szereg niejednoznacznych sformułowań. Na przykład na str. 51 stwierdzono, iż „poziomowanie produkcji powinno się odbywać dla wyrobów produkowanych według zasad produkcji seryjnej”. Nie wyjaśniono jednak pojęcia „zasady produkcji seryjnej” oraz w jaki sposób zasady te zastały zaadaptowane do opracowanej metodyki. W następnym zdaniu stwierdzono, że jeżeli przedsiębiorstwo posiada w swoim asortymencie wyroby, które produkowane są jednostkowo lub nawet małoseryjnie, ale niezwykle rzadko, to takie wyroby nie powinny być zawarte w codziennym harmonogramie produkcji”. Nie wyjaśniono dokładniej tego założenia oraz nie wskazano, w jakim harmonogramie powinny być ujęte wyroby produkowane małymi seriami.
6. Nieprecyzyjnie opisano etap 5 metodyki (opracowanie wariantów harmonogramów produkcji). Nie wyjaśniono, dlaczego w wariantcie 1 w celu podziału serii na partie transportowe zastosowano regułę „najpierw najdłuższy czas operacyjny”. Podobnie nie wyjaśniono, dlaczego w wariantcie 2 przyjęto regułę „najpierw najkrótszy czas operacyjny”. Lakoniczna informacja o tym, iż obie te reguły „pozwalają na osiągnięcie minimalnych wartości wskaźnika  $C_{max}$ ” jest niepoprawna, ponieważ przywołane reguły nie gwarantują uzyskania uszeregowania o minimalnej wartości wskaźnika  $C_{max}$ . Nawet jeżeli zastosowanie reguły „najpierw najkrótszy czas operacyjny” pozwoliłoby przypadkowo na uzyskanie minimalnego wskaźnika  $C_{max}$  to zastosowanie reguły „najpierw najdłuższy czas operacyjny” nie pozwoliłoby na uzyskanie takiego samego wyniku.
7. W opisie etapu 6 opracowanej metodyki znalazło się szereg nieścisłości. Na przykład na str.53 stwierdzono „Im wartość  $C_{max}$  jest mniejsza, tym [...] spływ wyrobów z produkcji będzie szybszy, co pozwoli na bardziej skuteczną realizację zamówień klientów” Nie wyjaśniono pojęcia „skuteczna realizacja zamówień klientów”. Należy też bardzo ostrożnie podchodzić do zamieszczonego w pracy sformułowania „wskazanie harmonogramu o mniejszej wartości wskaźnika ( $C_{max}$ ) pozwala na

uzyskanie [...] wyższego wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas”. Istnieje bardzo dużo badań, które wskazują, że uszeregowanie z minimalnym wskaźnikiem  $C_{max}$  nie charakteryzuje się też minimalnym wskaźnikiem zamówień zrealizowanych na czas.

8. Na rys. 3.11 przedstawiony został harmonogram wariantu 1 przy założeniu produkcji dwóch partii każdego wyrobu zgodnie z regułą „najpierw najdłuższy czas operacyjny”. Z kolei na rys. 3.12 przedstawiono harmonogram wariantu 2 przy założeniu produkcji dwóch partii każdego wyrobu zgodnie z regułą „najpierw najkrótszy czas operacyjny”. Ponieważ wariant nr 1 ma mniejszą wartość wskaźnika  $C_{max}$ , to on został wybrany do wdrożenia w przedsiębiorstwie. Nie wyjaśniono, dlaczego porównano tylko te dwa warianty oraz dlaczego nie zastosowano innych reguł heurystycznych (np. FIFO, EDD, reguły minimalnej rezerwy czasu obróbkowego itp.). Nie wskazano powodów, dla których niemożliwe stało się znalezienie uszeregowania optymalnego ze względu na wskaźnik  $C_{max}$  oraz dlaczego nie zastosowano np. algorytmu genetycznego w celu znalezienia rozwiązania suboptymalnego. Nie wyjaśniono też w sposób wyczerpujący, dlaczego wybór wariantu harmonogramu produkcji przeprowadzono w oparciu o wskaźnik  $C_{max}$ . Wskazanie, iż przyjęto ten sposób wyboru harmonogramu ze względu na to, że „im wartość  $C_{max}$  jest mniejsza, tym założona produkcja zrealizowana będzie szybciej, a przez to szybciej rozpocznie się produkcja kolejnego cyklu produkcji” jest bardzo powierzchowne i nie uwzględnia kryterium, które legło u podstaw opracowania proponowanej metodyki planowania produkcji „umożliwienie zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów gotowych”.

#### **4. Końcowa ocena rozprawy**

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Rewers jest pozytywna. Autorka wykazała się teoretyczną i praktyczną wiedzą z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, analizy procesów produkcyjnych oraz zagadnień związanych z organizacją produkcji w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Przedstawione w rozprawie badania stanowią oryginalny wkład w rozwój wiedzy w zakresie opracowania metody planowania produkcji, a w szczególności w zakresie poziomowania produkcji. W pracy została opracowana oryginalna metodyka poziomowania



produkcji, która może być wykorzystana w praktyce przemysłowej. Ważnym elementem pracy są przeprowadzone prace weryfikacyjne potwierdzające możliwość praktycznego wykorzystania opracowanego rozwiązania. Opracowana metodyka została zweryfikowana za pomocą eksperymentu symulacyjnego oraz eksperymentu doświadczalnego polegającego na wykorzystaniu rzeczywistych danych z dwóch wydziałów przedsiębiorstwa produkcyjnego. W obu przypadkach wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas był wyższy w porównaniu do planowania bazowego (str. 103).

Ważnym osiągnięciem pracy jest holistyczne podejście do zagadnień związanych z planowaniem procesów produkcyjnych. Zastosowane w pracy metody badawcze (badanie literatury, badania symulacyjne, badania statystyczne oraz badania ankietowe) są trudne w stosowaniu i wymagają dużego zaangażowania od prowadzącego badania, konsekwencji i umiejętności metodycznego prowadzenia badań oraz analitycznego myślenia.

**Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Rewers w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT

Szczecin 25.08.2023



