

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Santarek
Politechnika Warszawska
Instytut Organizacji Systemów Produkcyjnych
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, 28.08.2022 r.

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Ciepłińskiego
pt. „Metoda harmonogramowania produkcji małoseryjnej z uwzględnieniem
zmiennych warunków realizacji operacji technologicznych”.**

1. Wstęp.

Podstawą formalną sporządzenia recenzji było pismo nr RDIME.512.28.2022 z dnia 29.06.2022 r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej Pani prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak. Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest operatywne planowanie produkcji z wykorzystaniem harmonogramów i z uwzględnieniem niektórych zakłóceń, w tym zwłaszcza związanych z pracownikami oraz stosowaną technologią i maszynami. Zmienność warunków realizacji zadań produkcyjnych jest zjawiskiem powszechnym, utrudniającym planowanie produkcji i powodującym trudności w dochowaniu dyrektywnych terminów realizacji zamówień dla klientów, wzrost długości cykli produkcyjnych, nadmierne zapasy robót w toku, przekroczenia zaplanowanych kosztów produkcji, problemy z jakością, i in. Z drugiej strony problem ten jest zazwyczaj pomijany bądź co najwyżej traktowany pobieżnie przez naukowców i praktyków zajmujących się harmonogramowaniem produkcji. W praktyce jest kilka sposobów radzenia sobie z tym problemem. Najczęściej jest to planowanie produkcji z uwzględnieniem kompensatorów zakłóceń (najczęściej buforów-rezerw czasu), kontrola dostępności zasobów przed uruchomieniem (dyspozycją) zleceń oraz cykliczna aktualizacja (korekta) harmonogramów w przypadku nadmiernej kumulacji opóźnień. Doktorant przyjął inną koncepcję: uwzględnianie przewidywanych zakłóceń bezpośrednio już w trakcie budowy planów (harmonogramów) produkcji. Można zatem stwierdzić, iż problem jakim się zajął Doktorant jest istotny, interesujący z naukowego punktu widzenia oraz ważny dla praktyki.

Głównym celem pracy była ocena wpływu warunków realizacji operacji technologicznych na jakość harmonogramu produkcji na przykładzie produkcji

małoseryjnej a ponadto opracowanie nowej, efektywniejszej metody harmonogramowania produkcji uwzględniającej niektóre zmienne warunki realizacji produkcji. Realizacja tych celów wymagała stworzenia „warsztatu” badawczego, obejmującego m.in. formalną reprezentację procesów technologicznych oraz opracowanie modelu wirtualnego przedsiębiorstwa stanowiącego środowisko cyfrowe (wirtualne) do prowadzenia badań. Cele, teza oraz zakres pracy zostały sformułowane poprawnie i jednoznacznie.

2. Kompozycja i treść rozprawy.

Praca doktorska mgr inż. Piotra Cieplińskiego pt. „Metoda harmonogramowania produkcji małoseryjnej z uwzględnieniem zmiennych warunków realizacji operacji technologicznych” liczy 188 stron. Składa się z wprowadzenia, 10 rozdziałów głównych, podsumowania oraz spisu literatury. Część wstępna obejmująca rozdziały 1-10 jest nadmiernie rozczłonkowana a także zbyt obszerna. Zasadnicza część pracy (metodyka badań, badania własne oraz podsumowanie i wnioski) zawarta jest w rozdz.11 - 12. Szczególne miejsce w pracy zajmuje spis literatury, bardzo obszerny, obejmujący łącznie aż 253 pozycje.

Struktura pracy budzi pewne wątpliwości. Część wstępna (teoretyczna) pracy jest nadmiernie rozczłonkowana - liczy 7 rozdziałów co stanowi blisko 50% objętości (wraz z metodyką jest to 10 rozdziałów i 107 stron tekstu). Część zasadnicza pracy (badania własne) stanowi treść rozdziału 11 liczącego tylko 53 str. W pracy zamieszczono bardzo obszerny wykaz literatury liczący aż 253 pozycje o różnej wartości merytorycznej. Można sądzić, iż zabrakło starannej selekcji literatury i wyboru tekstów „kanonicznych”, najważniejszych dla tematyki pracy. Pominięto na przykład literaturę poświęconą modelom i metodom programowania matematycznego - optymalizacyjnym budowy harmonogramów.

Praca została napisana na ogół dobrym językiem. Nie uniknięto niestety dość licznych błędów literowych i stylistycznych.

Doktorant we wstępie zadeklarował opracowanie autorskiej metody harmonogramowania produkcji, różniącej się od istniejących metod m.in. uwzględnieniem zmiennych warunków technologicznych. Metoda, zgodnie z założeniami, będzie uniwersalna i może być zastosowana wraz z dowolnym algorytmem optymalizacyjnym harmonogramowania produkcji. Eksperymenty weryfikujące opracowaną metodę realizowano z wykorzystaniem modelu wirtualnego przedsiębiorstwa. Model ten został opracowany przez zespół kilku Autorów, w tym doktoranta, i opublikowany w dwóch pracach [42, 43] zamieszczonych w

spisie literatury. W rozprawie wielokrotnie znaleźć można odsyłacze do tych publikacji, sugerujące, iż część wyników badań w doktoracie pochodzi z tych publikacji. Kwestie te należałoby wyjaśnić w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej, a w szczególności:

- kwestię praw autorskich do opracowanego narzędzia badawczego,
- możliwości i zakresu wykorzystania w rozprawie wyników pracy zespołowej opublikowanych wcześniej.

W rozdziale drugim dokonano próby przeglądu i charakterystyki najważniejszych systemów informatycznych stosowanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych, szczególną uwagę zwracając na systemy APS. Dla porządku należałoby również wspomnieć o systemach PLM oraz systemach wspomagających obsługę (eksploatację) wyrobów stosowanych przez służby serwisowe przedsiębiorstwa-producenta oraz przez użytkowników-nabywców wyrobów gotowych.

W trzecim rozdziale omówione zostały problemy i narzędzia pozyskiwania wiedzy o procesie produkcyjnym. Są to istotne problemy występujące w każdym systemie sterowania produkcją, w którym istnieją pętle sprzężenia zwrotnego i możliwości korekty przebiegu procesu produkcyjnego. Rozdział ma charakter ogólny, nawiązuje do problematyki Przemysłu 4.0 jednak jest luźno związany z przedmiotem pracy. W szczególności w opracowanym algorytmie oraz przeprowadzonych badaniach brak jest nawiązania do tematyki tego rozdziału, w tym do Przemysłu 4.0.

Rozdział 4 poświęcony został harmonogramowaniu produkcji. Przedstawiono w nim klasyfikację problemów harmonogramowania, zagadnienia wyznaczania czasu trwania operacji produkcyjnych oraz metody rozwiązywania zadań harmonogramowania. Treść tego rozdziału wskazuje, iż Doktorant posiada wiedzę dotyczącą zagadnień będących przedmiotem rozprawy. W rozdziale tym zabrakło jednak sformułowania formalnego modelu harmonogramowania produkcji a w konsekwencji pominięto metody optymalizacji harmonogramów wykorzystujące te modele (dotyczy to także wykazu literatury).

Wyznaczanie czasu trwania operacji produkcyjnych jest związane z problemem tworzenia bazy normatywów planistycznych, normowaniem czasów trwania operacji oraz technologicznym przygotowaniem produkcji. Harmonogramowanie produkcji zwykle prezentuje się w szerszym kontekście planowania i sterowania produkcją. W rozprawie harmonogramowanie potraktowano natomiast jako problem autonomiczny.

Rozdział 5 dotyczy identyfikacji czynników mających wpływ na dokładność wyznaczania czasów trwania operacji. Są one znane i stanowią przedmiot badań od kilkudziesięciu lat nie tylko w ramach inżynierii mechanicznej (inżynierii produkcji) lecz także

w ramach zarządzania ogólnego, organizacji pracy, ergonomii, fizjologii i psychologii pracy i innych dyscyplin naukowych. W rozdziale tym zostały zachwiane proporcje pomiędzy czynnikami związanymi z pracownikami oraz czynnikami związanymi z techniką (maszyny i procesy technologiczne). Symptomatyczne jest także pominięcie problemu integracji planowania produkcji (w tym harmonogramowania) i obsługi eksploatacyjnej maszyn, co przynajmniej częściowo ułatwia złagodzenie skutków wpływu dostępności maszyn i urządzeń technologicznych na harmonogramy produkcji. Rozdział piąty z powodzeniem mógłby zostać znacznie skrócony i włączony do rozdz.4.

W rozdziale 6 omówiono uwarunkowania technologiczne mające wpływ na przebieg realizacji procesów technologicznych. Zawiera on ogólne informacje dotyczące arbitralnie wybranych, tradycyjnych technik wytwarzania. Treść tego rozdziału zawiera wiele koncepcji, na ogół luźno związanych z tematem pracy czego przykładem są rozważania na temat wpływu parametrów procesu obróbki na jakość wyrobu (str.68). Wprawdzie w rozprawie w wielu miejscach są odwołania do współczesnych rozwiązań technologii i organizacji produkcji, to jednak w rozdziale 6 jest mowa o tradycyjnych rozwiązaniach (przykład: montaż ręczny, str.70).

Rozdział 7 poświęcony został koncepcji wirtualnego przedsiębiorstwa. Wyjaśniono w nim istotę i cel wirtualnego przedsiębiorstwa. Trudno jednak doszukać się bliższych informacji pokazujących budowę i wykorzystanie modelu wirtualnego przedsiębiorstwa. Doktorant powołuje się także na swoje wcześniejsze współautorskie publikacje w których zamieszczono opis i sposób wykorzystania takiego modelu sugerując, iż powstał on w ramach rozprawy (str.73). Wyjaśnienia wymaga zatem kwestia praw autorskich oraz udziału Doktoranta w opracowaniu tego modelu.

Pewien niedosyt po lekturze tych rozdziałów (1-10) budzi brak jakiegokolwiek podsumowania i wniosków, co mogłoby być dobrym wstępem do sformułowania celu i tezy pracy (rozdz.8) oraz zakresu (rozdz.9) i metodyki badawczej (rozdz.10).

Głównym celem rozprawy była „ocena wpływu ... zmiennych warunków realizacji operacji technologicznych na jakość harmonogramu produkcji ...” a także „opracowanie nowej, efektywniejszej metody harmonogramowania produkcji, która uwzględni szerszy zakres zmiennych uwarunkowań technologicznych w stosunku do istniejących rozwiązań”. Zakres pracy obejmuje 10 zadań logicznie związanych ze sformułowanymi celami pracy.

Rozdział 10 zatytułowany metodyka badawcza zawiera wiele wątków. Opracowano ankietę celem zgromadzenia danych na temat trzech przedsiębiorstw w których prowadzono badania oraz wpływu wybranych czynników na przebieg procesu produkcyjnego. Nie

zamieszczono jednak treści ankiety ani też zebranych informacji. W szczególności nie wyjaśniono jaki typ zadań harmonogramowania jest dominujący w tych przedsiębiorstwach, typ produkcji, zakres, dostępność i kompletność danych niezbędnych do budowy harmonogramów.

W ramach prac wstępnych opracowano model struktury danych w konwencji diagramów ERD. Z formalnego punktu widzenia oraz dla potrzeb planowanych badań diagramy te są poprawne. Po raz kolejny powrócono do modelu wirtualnego przedsiębiorstwa, traktowanego jako środowisko w którym prowadzone będą badania nowej metody harmonogramowania. Rozdział ten dostarcza kolejną dawkę informacji, nie wyjaśniając jednak wszystkich wymienionych wcześniej pytań i wątpliwości. Na rys.26 (str.88) pojawia się po raz pierwszy blok APS. Co się za nim kryje ?

Nowy algorytm harmonogramowania produkcji to w rzeczywistości znany od dawna algorytm Monte Carlo, mający liczne zastosowania, w tym także w inżynierii produkcji. W pracy nazywa się go i traktuje jako algorytm autorski. Wiele miejsca poświęcono sformułowaniu warunków dopuszczalności rozwiązań – realizowalności harmonogramów. Przedstawione formuły są poprawne, chociaż są one znane (niekiedy w nieco innym sformułowaniu, zwłaszcza w modelach optymalizacji harmonogramów). Warto zwrócić uwagę, iż Doktorant analizuje warunki realizowalności harmonogramu zakładając, iż produkowany jest jeden rodzaj (asortyment) wyrobów. Jak należałoby zmodyfikować te warunki w przypadku produkcji wielu asortymentów wyrobów jak ma to miejsce m.in. w produkcji małoseryjnej ?

Do oceny jakości harmonogramów Doktorant zastosował dwa klasyczne kryteria: długości uszeregowania zadań oraz kosztu realizacji procesu produkcyjnego. W zadaniach harmonogramowania koszty realizacji procesu produkcyjnego zależą zazwyczaj przede wszystkim od długości cyklu produkcyjnego. Ograniczając się do produkcji dyskretnej i budowy maszyn, można postawić pytanie czy koszty materiałów zależą, a jeśli tak to w jaki sposób od długości cyklu produkcyjnego ? Z drugiej strony pominięto koszty zamrożenia robót w toku, które są funkcją długości cyklu produkcyjnego, czyli czasu zamrożenia robót w toku.

Zasadnicze wyniki uzyskane przez Doktoranta zamieszczono w rozdziale 11 zatytułowanym „Badania własne”. Przedstawiono w nim wyniki badań ankietowych prowadzonych wśród pracowników wytypowanych przedsiębiorstw oraz wyniki badania wpływu wybranych czynników na jakość harmonogramów. Komentarza wymaga kwestia reprezentatywności próby dla której prowadzono badania a także wiarygodności i przydatności

uzyskanych informacji. Analiza czynników mających wpływ na przebieg procesu produkcyjnego mogłaby być dokonana w bardziej obiektywny sposób. Informacje można byłoby zdobyć metodami o większej wiarygodności naukowej, w tym ilościowymi. Odpowiedzi na pytania w ankiecie są subiektywne i przez to niejednoznaczne. Przykładem jest rys. 45 i następne (skala odpowiedzi: niski wpływ, umiarkowany, wysoki, bardzo wysoki). Ankiety nie charakteryzują ponadto trzech przykładów testowych, np. czy produkowany jest tylko jeden wyrób, czy też jest to wieloasortymentowa produkcja małoseryjna.

Zasadnicze badania dotyczyły wpływu wybranych czynników na długość cyklu produkcyjnego wyrobów (długość uszeregowania zadań) oraz na koszt realizacji procesu produkcyjnego. Badania przeprowadzono na danych rzeczywistych dotyczących trzech różnych wyrobów porównując harmonogramy przebiegu produkcji zakładając stałe parametry procesu (zwłaszcza czasy trwania operacji) oraz uwzględniając wpływ zmiennych warunków realizacji procesów produkcyjnych. Wyniki potwierdziły istnienie wpływu zmiennych uwarunkowań realizacji operacji produkcyjnych na długość cyklu oraz koszt realizacji procesu produkcyjnego. Dla pełnego obrazu uzyskanych wyników zabrakło w pracy przykładu zbudowanego harmonogramu i dyskusji na temat możliwości wykorzystania wyników badań w praktyce, w tym zwłaszcza w systemach planowania operatywnego produkcji małoseryjnej.

3. Uwagi

Lektura pracy nasuwa szereg uwag natury ogólnej jak i bardziej szczegółowej. Zgadzając się, iż wiele czynników zakłóca przebieg procesu produkcyjnego, powodując wydłużenie cykli produkcyjnych, zabrakło w pracy analizy i propozycji rozwiązań mających na celu ograniczenie wpływu tych czynników. Jest tych rozwiązań wiele, w tym również przydatnych w warunkach niższych typów produkcji.

Zjawisko produkcyjnego uczenia się zaobserwowano blisko 100 lat temu. Jest ono z powodzeniem wykorzystywane w wielu przedsiębiorstwach i w wielu rodzajach produkcji. Należy jednak pamiętać, iż obok zjawiska produkcyjnego uczenia (nabywania wprawy) czego efektem jest m.in. wzrost wydajności, występuje zjawisko odwrotne – zapomnienia, utraty wprawy, zwłaszcza, gdy występują częste zmiany zadań produkcyjnych, na przykład w produkcji małoseryjnej (str.35).

Sieciowe metody planowania (CPM, PERT, i in.) mają ograniczone zastosowanie w harmonogramowaniu produkcji, zwłaszcza produkcji wieloasortymentowej, zmiennej

oraz wyrobów prostych (części, przedmiotów). Doskonale natomiast spełniają swoje zadanie w planowaniu produkcji wyrobów złożonych, o długich czasach realizacji czynności (str.36). Reguły priorytetów służą z kolei do dynamicznego planowania obciążenia zasobów nie zaś do budowy harmonogramów obejmujących określony przedział (horyzont) czasu – str.36. Są to problemy podobne ale nie tożsame.

W przeglądzie metod harmonogramowania produkcji (rozdz.4.3) pominięto metody programowania matematycznego. Co prawda większość nietrywialnych zadań harmonogramowania jest obliczeniowo trudna i w ogólnych przypadku znalezienie rozwiązania optymalnego metodami ścisłymi (dokładnymi) nie jest możliwe, to jednak wiele pomysłów i szczegółów modeli i metod optymalizacyjnych można wykorzystać dobierając bądź projektując metody przybliżone. Przydatne byłoby także sformułowanie formalnego modelu matematycznego zadania harmonogramowania, czego nie znalazłem w pracy. Ten a także wiele innych rozdziałów należałoby zakończyć wnioskami zawierającymi chociażby ocenę istniejącego stanu wiedzy i pokazującymi kierunki potencjalnych badań.

Niedosyt budzi sposób prezentacji wyników pracy. Jest on bardzo ogólny, utrudniający nie tylko zapoznanie się ze szczegółami proponowanych rozwiązań lecz także ich merytoryczną ocenę. Nie zamieszczono między innymi modelu formalnego (matematycznego) zadania optymalizacji harmonogramów w warunkach produkcji małoseryjnej a poszukiwanie takich harmonogramów było przecież jednym z głównych celów pracy. Równie skąpe są informacje na temat opracowanej metody harmonogramowania oraz modelu przedsiębiorstwa wirtualnego, stanowiącego środowisko w którym prowadzone były badania.

Badania prowadzono na danych dotyczących trzech wyrobów pochodzących z trzech różnych przedsiębiorstw. Informacje na ich temat są nadzwyczaj skąpe. Nie wiadomo czy są to wyroby proste (przedmioty, części) czy też złożone, realizowane w procesach dyskretnych czy też ciągłych. Brak rysunków (szkiców) wyrobów, opisu procesów technologicznych, wielkości zadań produkcyjnych (zamówień), podziału zamówień na partie produkcyjne, organizacji produkcji, itp. Nie zamieszczono także, chociażby w charakterze przykładu, rysunku zbudowanego harmonogramu produkcji.

Tytuł pracy sugeruje, iż opracowane zostaną harmonogramy dla produkcji małoseryjnej natomiast z tekstu pracy wynika, iż w każdym z trzech rozpatrywanych przykładów produkowany jest tylko jeden wyrób. Czy możemy zatem twierdzić, iż mamy tu do czynienia z produkcją małoseryjną ?. Oczekuję, iż te oraz wcześniejsze uwagi i pytania zostaną wyjaśnione przez Doktoranta.

Praca sprawia wrażenie pisanej w pośpiechu, bez zwrócenia dostatecznej uwagi na stronę redakcyjną rozprawy. W pracy znajduje się dość dużo usterek językowych, terminologicznych i edycyjnych. Ograniczę się do kilku przykładów:

- „adaptacja procesów produkcyjnych pod stale zachodzące zmiany” oraz „stale napływające zmiany warunków” – niejasne stwierdzenia – str.13
- należy odróżnić wykresy Gantta od harmonogramów – str.29
- metoda obserwacji migawkowych nie służy normowaniu czasu pracy lecz ustalaniu struktury wykorzystania czasu pracy (maszyny, pracownika, itp.) – str.45, tabl.1
- co oznaczają terminy „operacje narzędziowe”, „zdolności maszyny” – str.84
- termin „widelki czasowe” jest określeniem żargonowym - str.104
- określenie „minimalizacja kryterium optymalizacyjnego” jest niezrozumiałe – str.106

4. Ocena uzyskanych wyników i wnioski końcowe

Doktorant zrealizował cele pracy oraz program badań pokazując, na wybranych przykładach istnienie wpływu zmiennych parametrów procesu produkcyjnego na długość cyklu produkcyjnego oraz na koszty realizacji procesu produkcyjnego. Wymagało to zaprojektowania i zbudowania instrumentarium badawczego, obejmującego m.in. model wirtualnego przedsiębiorstwa oraz algorytm generowania harmonogramów z wykorzystaniem metody Monte Carlo.

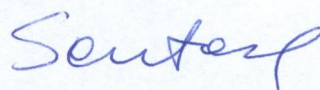
Temat, który podjął Doktorant jest ważny dla praktyki, nie tylko w warunkach produkcji małoseryjnej. Naukowcy, mający tendencję do modelowego, a więc z konieczności uproszczonego podejścia, pomijają zazwyczaj problem wpływu warunków produkcyjnych na harmonogramowanie produkcji pozostawiając jego rozwiązanie na poziomie planowania operatywnego, dyspozycji i kontroli realizacji zleceń, itp. Tym samym temat rozprawy doktorskiej jest interesujący i ważny dla praktyki oraz zasługuje na kontynuację badań.

Ciekawym podejściem zaproponowanym przez Doktoranta jest integracja problemu doboru zasobów (maszyn i urządzeń technologicznych) z szeregowaniem zadań. Zazwyczaj problemy te traktowane są rozłącznie. Propozycja Doktoranta jest ciekawa i warta dalszych badań.

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Cieplińskiego pt. „Metoda harmonogramowania produkcji małoseryjnej z uwzględnieniem zmiennych warunków reali-

zacji operacji technologicznych” mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (subdyscyplina inżynieria produkcji).

Biorąc pod uwagę merytoryczną ocenę pracy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Cieplińskiego pt. *Metoda harmonogramowania produkcji małoseryjnej z uwzględnieniem zmiennych warunków realizacji operacji technologicznych*” stwierdzam, że pomimo kilku kwestii dyskusyjnych, praca odpowiada ustawowym wymaganiom dotyczącym rozpraw doktorskich i wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Krzysztof Santarek