

Dr hab. inż. Jan Duda Prof. PK  
Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji  
Politechniki Krakowskiej  
31-864 Kraków  
Al. Jana Pawła II 37  
[jan.duda@pk.edu.pl](mailto:jan.duda@pk.edu.pl)  
tel. 12 628-32-84 12 628-32-50  
tel. kom. 515105689

Kraków 30.08.2023



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Macieja Kowalskiego pt.:

Metodyka automatyzacji programowania obróbki specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego dla obrabiarek CNC w zintegrowanym środowisku CAD/CAM.

### podstawa opracowania:

Pismo oraz umowa o dzieło nr 0600/2023/116 z Politechniką Poznańską reprezentowaną przez Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. Olafa Ciszaka Prof. PP.

### **1. Uwagi ogólne, ocena struktury i zawartości pracy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Macieja Kowalskiego liczy 129 stron ujętych w jednostronnie napisany maszynopis. W treści rozprawy zawarto 99 rysunków, 16 tabel. Kolejne punkty rozprawy poprzedzono streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści oraz wykazem symboli i oznaczeń. We wstępie przedstawiono wprowadzenie w tematykę rozprawy wskazując na postępujący dynamiczny rozwój automatyzacji i technologii informatycznych w obszarze zarządzania produkcją przedsiębiorstwa, który wynika między innymi z coraz szerszego stosowania masowej kustomizacji. Jej przejawem jest dążenie do masowej produkcji wyrobów dostosowanych do indywidualnych potrzeb klienta. Stawia to określone wymagania dla działów technicznego przygotowania produkcji i konieczności wsparcia tych działań przez systemy komputerowego wspomaganie CAD/CAM/CNC i stosowania metod projektowania opartych na wiedzy KBE. W pracy podjęto tematykę automatyzacji programowania obróbki skrawaniem elementów specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego.

W punktach 1-4 zaprezentowano analizę literatury w świetle tematu pracy. W punkcie 1 przedstawiono rolę i znaczenie oprzyrządowania specjalnego koncentrując się na specyfice branży motoryzacyjnej. Ze względu na masową skalę produkcji oprzyrządowanie specjalne jest zazwyczaj dostarczane przez firmy kooperujące – dostawców, na podstawie projektu wyrobu wykonanego przez klienta - producenta wyrobu finalnego lub komponentów. Z uwagi na specyfikę rynku, wspomnianą

kastomizację częste zmiany asortymentu i dostosowanie do wymagań klientów produkcja wyrobów odbywa się w wielu wariantach przy zastosowaniu wymiennego oprzyrządowania specjalnego. Wymaga stosowania strategii rozwojowych, zwiększa wymagania i złożoność systemów zarządzania rozwojem wyrobów. W drugiej części tego punktu przedstawiono proces wytwarzania OS w środowisku CAD/CAM. Schemat jest uproszczony. Powinien obejmować wszystkie zadania projektowe, również te realizowane poza systemem przez technologa obejmujące projektowanie procesu technologicznego montażu, projektowanie półfabrykatu i struktury procesu obróbki elementów składowych, analizę projektu oprzyrządowania z punktu widzenia montażu i wytwarzania, doboru maszyn i oprzyrządowania technologicznego. W punkcie 1.3 wskazano na potrzebę automatyzacji programowania obróbki elementów składowych OS. Punkt 2. zatytułowany „Programowanie obrabiarek CNC” zawiera opis metod programowania ręcznego, dialogowego z nakładkami w systemach sterujących oraz konwersacyjnego w systemach CAM. Wskazano na wysoki potencjał w zakresie automatyzacji. Zagadnienia te szerzej rozwinęto w punkcie 3, w którym wskazano na konieczność większej integracji systemów CAD/CAM z systemami wspomaganego komputerowo projektowania procesów obróbki CAPP oraz omówiono, w punkcie 3.2, metody projektowania procesu obróbki. W punkcie 3.3 na podstawie przeprowadzonej analizy literatury Autor wskazał na dwa kierunki działań pozwalających na automatyzację programowania obrabiarek CNC; zastosowanie szablonów obróbki i metody rozpoznawania cech ang. FR (ang. *Feature Recognition*). W opisie programowania wykorzystującego szablony obróbki stwierdzono, „...Technolodzy na podstawie własnego doświadczenia tworzą szablony obróbki, które są w stanie przypisywać konkretnym częściom lub grupom części”. Nie podano jednak jak, dla jakiego zakresu procesu technologicznego i w oparciu o jaką informację tworzone są szablony obróbki. Przedstawiono również, w ramach wstępnych prac badawczych, test skuteczności metody rozpoznawania cech FR do przygotowania programów obróbki dla rodziny części (form do łączenia rur z konektorami) z wykorzystaniem oprogramowania Catia V5. Podstawą do przeprowadzenia testu były, przygotowane przez technologa, karty technologiczne, które nie ujmuje pełnej informacji nt. procesu technologicznego. W karcie technologicznej wyspecyfikowano w kolumnie 1 numery operacji 10, 20, 30... Definicja operacji obejmuje część procesu technologicznego realizowanego na jednym stanowisku pracy- obrabiarce a karta technologiczna powinna zawierać sekwencję operacji technologicznych przekształcających określony półfabrykat w gotowy wyrób. Szczegóły operacji z rozpisaniem na ustawienia, pozycje, zabiegi wraz ze szkicami definiującym sposób bazowania i mocowania przedmiotu obrabianego powinny być podane na karcie instrukcyjnej. Zaproponowany układ kart wynika zapewne z faktu, że pojęcie „operation”



w systemach CAM jest często utożsamiane z wyżej określonym pojęciem operacji. Dla oceny merytorycznej poprawności opracowanych kart wskazane byłoby zamieszczenie rysunków wykonawczych przedmiotu obrabianego.

W punkcie 4 pt. „Projektowanie oparte na wiedzy” zawarto zagadnienia: zarządzania wiedzą, reprezentacji wiedzy w szeroko rozumianej inżynierii oprogramowania. Moim zdaniem, z punktu widzenia tematu rozprawy, należałoby w szerszym zakresie przeanalizować literaturę z zakresu modelowania i reprezentacji struktur procesów technologicznych obróbki oraz wiedzy technologicznej. W punkcie 4.4 przedstawiono metodyki budowy systemów klasy KBE głównie w obszarze kreowania konstrukcji w tym także ważnych z punktu widzenia celu pracy wyrobów konfigurowalnych z wykorzystaniem inteligentnych modeli CAD/CAM. W punkcie 4.5 przedstawiono przykłady wdrożeń systemów KBE w obszarach nie związanych z programowaniem CNC z wyjątkiem procesu projektowania wyrobów konfigurowalnych (łączników sanitarnych) z wykorzystaniem autorskiej metodyki MDAVP. W końcowej części punktu 4, Autor stwierdza, że podobne rozwiązania typu KBE można zastosować do programowania obrabiarek CNC w programach CAM w odniesieniu do oprzyrządowania specjalnego.

Fragment tekstu „Budowa systemu tego typu do programowania obrabiarek CNC powinna obejmować opracowanie bazy wiedzy, w postaci aplikacji bazy danych, pozwalającej na gromadzenie i przetwarzanie danych o projektowanym procesie technologicznym obróbki. Taka baza z powodzeniem mogłaby pełnić rolę systemu CAPP, pozwalając na generowanie kart technologicznych dla wariantów części w rodzinie oprzyrządowania” jest nieprecyzyjny. Aplikacja bazy danych z definicji nie może być bazą wiedzy i może umożliwiać zapis wyników pracy systemu CAPP a nie pełnić, jak sugeruje Autor, roli systemu CAPP.

Ten fragment tekstu będący fragmentem podsumowania analizy literatury i próbą sformułowania założeń dla systemu automatyzującego programowanie CNC, powinien być przeniesiony do punktów 5.1 i 5.2.

Moim zdaniem należałoby, treść punktu 3.3.3 opisującego wstępne prace badawcze zamieścić później, w punkcie 5.3, wyodrębniając w planie badań punkt pt. Badania wstępne. Natomiast w punktach 2-4 skoncentrować się na i zwięzłym opisanie stanu wiedzy z zakresu tematu rozprawy- narzędzi automatyzacji programowania i ich funkcjonalności stosowanych w komercyjnych systemach CAM.

W punkcie 5 przedstawiono cel, założenia i plan pracy. Autor wskazuje, że ... „istnieje duża potrzeba automatyzacji w zakresie programowania obróbki części produkcyjnego oprzyrządowania specjalnego.” oraz że ...” nie istnieją wzorce i schematy metodyczne opisujące sposób postępowania w przypadku rodzin części OS.” Jakimi cechami specyficznymi charakteryzuje się taka rodzina części? Czy zatem wypracowana

metodyka nie może być stosowana do dowodnej rodziny technologicznie podobnych części? W punkcie 5.3 przedstawiono założenia i plan badań wskazując, że kluczowym etapem metodyki będzie opracowanie szablonów wiedzy, dla których zostaną utworzone narzędzia w postaci aplikacji bazodanowej. Czy są to narzędzia inżynierii wiedzy? Założono walidację metodyki dla trzech przykładów programowania obróbki części składowych specjalnego oprzyrządowania realizowanych automatycznie i konwersacyjnie przez 10 programistów (5 początkujących i 5 doświadczonych). W punkcie 6 przedstawiono metodykę automatyzacji programowania w 6-ciu etapach projektowych z których etap 5 przygotowanie programów obróbki jest zautomatyzowany. Podstawą jest opracowany, na podstawie karty technologicznej (Etap 2), szablon obróbki (Etap 4), który jak stwierdza Autor ...” stanowi reprezentację wszystkich operacji technologicznych.” części należących do rodziny. Bardziej adekwatne byłoby stwierdzenie, że szablon obróbki stanowi uogólnioną strukturę procesu technologicznego części należących do rodziny. Szersze omówienie zastosowanego podejścia przedstawię w punkcie 3 recenzji. W punkcie 7 przedstawiono aplikację bazodanową wspomagającą stosowanie opracowanej metodyki. Nie jest to, jak stwierdza Autor, model w notacji BPMN, która jest dedykowana do modelowania procesów i tutaj mogłaby być zastosowana do opisu czynności procesu projektowania obróbki (Etapów 1-6 metodyki) i generowanych w ich wyniku danych zapisywanych w bazie danych projektowanego systemu. Rys.7.1 przedstawia diagram ERD (ang. *Entity – Relationship Diagram*) modelujący koncepcję bazy danych za pomocą: encji, ale bez zdefiniowania atrybutów oraz związków pomiędzy encjami. Diagramy ERD są stosowane w modelowaniu bazy danych dla procesów zarządzania procesem modelowanym w notacji BPMN na podstawie których i zdefiniowanych reguł decyzyjnych realizowany jest proces. W punkcie 7.3 przedstawiono procedurę opłacalności zaproponowanej metodyki wykorzystującą moduł aplikacji bazodanowej służący do prognozowania czasów przygotowania programów obróbki. W bazie danych archiwizowane są czasy przygotowania programów obróbki dla części należących do rodziny. Szczegóły sposobu obliczania prognozowanego czasu przygotowania programów obróbki przedstawiono w rozdziale 7.3 a nie, jak podano na str. 62, w rozdziale 8.

W punkcie 8 zaprezentowano przebieg i wyniki walidacji metodyki a w punkcie 9 podsumowanie i kierunki dalszych prac.

Tekst rozprawy zamyka wykaz 116 pozycji literaturowych, norm i dokumentów oraz zamieszczony na str. (125-129) spis rysunków, tabel.

Układ pracy jest w zasadzie poprawny. Zasadne byłoby zestawienie wniosków z analizy literatury (punkty 2-4) z punktu widzenia tematu rozprawy, zbiorczo, przed punktem 5 pt. Cel, założenia i plan pracy.



## **2. Ocena tematu, założeń, zakresu, celu i tezy pracy**

W przedłożonej do recenzji pracy wskazano na konieczność integracji systemów CAD/CAM z systemami wspomaganego komputerowo projektowania procesów obróbki. Jednak formułując, w oparciu o analizę literatury, przeprowadzoną w punkcie 2-4, założenia i plan pracy skoncentrowano się głównie na zagadnieniach automatyzacji programowania obróbki. Przy tak przyjętych założeniach temat rozprawy jest jednoznacznie sformułowany. Należałoby jednak, przy tak określonym celu, w szerszym zakresie dokonać analizy funkcjonalności systemów CAM z punktu widzenia możliwości automatyzacji programowania (np. tworzenia szablonów obróbki, identyfikacji cech technologicznych). Takie rozwiązania oferuje większość zaawansowanych systemów CAM, a zwłaszcza system Siemens NX w którym można generować cykle obróbki metodą rewersyjną, korzystając ze specjalnego języka programowania. Można również odwoływać się w tym języku do danych PMI (Product Manufacturing Information), jak tolerancje wymiarów, chropowatości itp. Należałoby także w szerszym zakresie odnieść się do standardu STEP-NC. Standard ten był i jest opracowywany z myślą o przenoszeniu wszystkich informacji potrzebnych do uruchomienia procesu obróbki na maszynach sterowanych numerycznie CNC (w zasadzie ograniczony jest do zabiegów frezarskich i tokarskich). Ważną sprawą jest sposób reprezentacji danych. Jest on w pełni zgodny z wcześniej opracowanym standardem STEP, służącym do zapisu geometrii przedmiotów w systemach CAD, zgodnie z normą ISO 10303. Zgodnie z tą normą struktury danych mogą być przedstawiane w formie uniwersalnego języka opisu struktur danych EXPRESS (norma ISO 10303-11) oraz w postaci graficznej, w języku EXPRESS-G. Norma ISO 10303-21 opisuje natomiast jak zapisać program STEP w formie pliku tekstowego a następnie jak go właściwie interpretować.

Postawiony cel pracy „opracowanie metodyki automatyzacji programowania obrabiarek CNC w obszarze obróbki skrawaniem rodzin elementów specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego jest sformułowany poprawnie. Jednak z punktu widzenia wykazanej w przeglądzie literatury dążenia do integracji w obszarach CAD/CAM/CNC zawężenie do automatyzacji programowania CNC z wykorzystaniem dedykowanych wzorców obróbki jest dyskusyjne. Postawiono także hipotezę, że tak określony zakres automatyzacji umożliwi skrócenie, czasu przygotowania i poprawę jakości programów obróbki oraz obniżenie kosztów wykonania oprzyrządowania.

## **3. Ocena merytoryczna**

W przedstawionej metodyce założono, że istotne z uwagi na jakość opracowanego procesu obróbki części zagadnienia: analiza modeli 3D rodziny części oprzyrządowania specjalnego oraz przygotowanie karty technologicznej dla przedstawiciela rodziny części

będą wykonywane ręcznie przez technologa. Karta technologiczna jest dokumentem przedstawiającym listę operacji technologicznych realizowanych w procesie technologicznym obróbki, w wyniku których następuje przekształcenie półfabrykatu w gotowy wyrób. Operacja jest częścią procesu technologicznego a której przebieg i dekompozycja na ustawienia (bazowanie +mocowanie), pozycje i przejścia jest opisany jest na karcie instrukcyjnej. Stosowany w pracy formularz karty technologicznej jest raczej kartą instrukcyjną ze specyfikacją zabiegów, które należy wykonać. Na podstawie tak opracowanej karty (przy braku pełnego opisu części (danych geometrycznych, tolerancji, chropowatości powierzchni) tworzony jest szablon obróbki. Wskazane byłoby zamieszczenie w pracy rysunków wykonawczych typowego przedstawiciela. Ich brak uniemożliwia weryfikację poprawności opracowania kart technologicznych dla przedstawionych w punkcie 8 reprezentantów rodzin części, dla których przedstawiono walidację proponowanej metody. W szablonie zaimplementowano dane z modelu geometrycznego reprezentanta i z karty technologicznej. Na podstawie przygotowanego szablonu generowane są programy obróbki dla poszczególnych części z rodziny poprzez realizację następującej sekwencji czynności:

- Wyboru części do obróbki poprzez wskazanie w strukturze programu obróbki modelu CAD 3D. Plik programu obróbki zawierać może odniesienia do modelu przedmiotu obrabianego,
- Wyboru półfabrykatu poprzez wskazanie w strukturze programu obróbki modelu CAD 3D. Plik programu obróbki zawierać może odniesienia do modelu półfabrykatu. Czy półfabrykat jest zdefiniowany dla typowego przedstawiciela. Jeżeli tak to powinien być podany na karcie technologicznej,
- Definiowania zabiegów, poprzez wskazanie geometrii do obróbki w danym zabiegu, wskazanie narzędzia skrawającego dla danego zabiegu, doboru strategii i parametrów procesu dla każdego zabiegu oraz generowanie ścieżki narzędzia w danym zabiegu.

Czy parametry realizacji zabiegów są wprowadzane poprzez okna dialogowe systemu CAM (jak sugeruje rys 6.6) czy też ...” dzięki opisowi metadanych wewnątrz modelu CAD danej części oraz przygotowanym skryptom” ... . Nie jest również wyjaśniona kwestia dezaktywacji zabiegów w strukturze programu. Rozwiązanie przyjęte przez Autora jest ukierunkowane na występowania lub brak pewnych cech (np. Rys. 8.23 Widok modeli 3D części rodziny OS 2). Dla rodziny części tworzony jest reprezentant, zawierający wszystkie cykle występujące w danej rodzinie, generowana jest dokumentacja, program obróbki, itp. (np. Rys. 8.5. Operacja technologiczna rodziny OS1). Czy jest możliwość generowania dodatkowych cykli, nawet jeżeli możliwości szablonów na to pozwalają? Co będzie, jeżeli dany przedmiot nie będzie miał otworów o

średnicy 4, 5 i 6.5 mm (Rys. 8.5), ale otwory o średnicach 8mm, 9 mm czy 10 mm? Możliwości szablonów w systemie Catia pozwalają na uwzględnienie takich przypadków (poprzez stosowanie warunków stosowania tzw. Checks). Czy Autor korzystał z takiej możliwości. W przemyśle wielokrotnie obrabiane są typoszeregi części, gdzie wymiary ulegają zmianie, a technologia jest ta sama, zmieniają się jedynie narzędzia (dotyczy to również obróbki kieszeni i rowków). Jak zatem po dezaktywacji będą realizowane ruchy jałowe narzędzia? Autor w punkcie dotyczącym walidacji metodyki stwierdza, że automatyczny dobór zabiegów do konkretnych elementów geometrycznych obrabianej części, wymaga wykonania aktualizacji (przeliczenia) trajektorii ruchu narzędzi. Czy będzie to przebieg optymalny z punktu widzenia minimalizacji czasu trwania tych ruchów?

W punkcie 8 dla wytypowanych trzech rodzin części oprzyrządowania montażowego i spawalniczego do spawania laserowego i zgrzewania punktowego przeprowadzona jest walidacja zaproponowanej metody. W sposób jednolity przedstawiono wyniki programowania z wykorzystaniem systemu CATIA V5 w VI etapach projektowych zgodnie z metodyką ACPUT. Nie podane zostały na karcie technologicznej, moim zdaniem, wszystkie niezbędne informacje (postać i wymiary półfabrykatu, sposób ustalenia części do obróbki (bazowanie +mocowanie) a zabiegi powinny mieć w nazwie rodzaj obróbki (frezowanie, wiercenie, rozwiercanie itp.). Z opisu wynika, że modele 3D części rodziny są modyfikowane poprzez utworzenie zbioru metadanych w postaci elementów geometrycznych związanych z określonymi zabiegami obróbki. Czy takie metadane należy przygotować dla każdego modelu i dodać do struktury modelu każdej części rodziny? Walidacja metody polegała na sprawdzeniu skuteczności oraz efektywności metodyki poprzez jej porównanie z konwersacyjną metodą programowania obrabiarek CNC w systemie CAM realizowaną przez programistów początkujących i doświadczonych. Programowanie odbywa się na podstawie przygotowanej wcześniej karty technologicznej co przy wykazanim wcześniej brakiem szczegółowości powodować może błędną interpretację danych przez programistów. Dla tak wyznaczonych trybów programowania wyznaczono czas i koszty poprogramowania części.

Autor ma świadomość, że konieczność przypisania nazw elementom geometrycznym jest czasochłonna „W opracowanej metodyce jednym z najbardziej czasochłonnych etapów jest przygotowanie modeli CAD dla szablonu obróbki, w którym elementom geometrycznym przypisuje się określone nazwy, aby możliwe było ich powiązanie z zabiegami technologicznymi.”. Należy jednak dodatkowo zwrócić uwagę na budowę dokumentacji dla takich szablonów, jeżeli ma z nich korzystać inny pracownik. Przykładowo, dla przedstawiciela z testowanego przykładu należy zdefiniować 33 elementy geometryczne (Rys. 8.6 Metadane zapisane w wybranych wariantach części

rodziny OS 1). Zaznajomienie się ze stosowanymi nazwami (PB, G1, WB) wymaga zapewne dużego czasu. Jeżeli szablon jest używany przez innego pracownika, należałoby być może rozważyć czy nie jest prostsze standardowe definiowanie elementów geometrycznych dla cyklu.

#### 4. Ocena redakcyjna

Słabością recenzowanego tekstu pracy jest:

- brak dokumentacji wykonawczej rodzin części analizowanych podczas wstępnych prac badawczych i na etapie walidacji metodyki,
- przyjęty format kart technologicznych i instrukcyjnych,
- brak opisu metadanych w szablonach obróbki.

W recenzowanym tekście pracy zauważyłem sporo błędów formalnych. Do najważniejszych zaliczam:

- str.25 Przy opisie metody generacyjnej stwierdzono, że „Metoda generacyjna zakłada automatyczne utworzenie wzorca procesu a w kolejnym zdaniu stwierdzono, że ...” w metodzie generacyjnej nie występuje faza tworzenia wzorca procesu. Charakteryzując z kolei metody semi- generacyjne stwierdzono, że ...” projektowanie procesu technologicznego polega na opracowaniu standardu głównego planu procesu” ..., gdy tymczasem w projektowaniu procesu obróbki wg tej metody stosuje się wzorec procesu tworzony dla zbioru części technologicznie podobnych określający zbiór reguł i zasad projektowania procesu- ujmujący wiedzę technologiczną niezbędną do zaprojektowania części należącego do tego zbioru.
- str. 30 rys 3,7 Błąd w opisie przykładowych cech technologicznych- rowków,

Wyżej wymienione błędy i niedociągnięcia oraz podany w uwagach ogólnych komentarz do układu pracy, sprawiają, że praca pod względem edytorskim jest przeciętna, a jej lektura jest utrudniona. Przedstawione uwagi formalne nie wpływają w sposób zasadniczy na moją pozytywną ocenę pracy.

#### 5. Wnioski końcowe

Pomimo dużej ilości uwag krytycznych w dużej części o charakterze dyskusyjnym stwierdzam, że wypracowane (na podstawie analiz literaturowych) przez Autora cele przytoczone w punkcie 2 recenzji, przy przyjętych założeniach, zostały osiągnięte. Uzyskane i przedstawione w podsumowaniu wyniki potwierdzają przydatność zastosowanej metodyki i potwierdzają spełnienie hipotezy, że automatyzacja umożliwiła skrócenie czasu przygotowania programów obróbki. Potwierdzona jest także hipoteza o





obniżeniu kosztów wytwarzania, ale głównie przez zmniejszenie kosztów przygotowania programów obróbki. Uzyskanie poprawy jakości programów obróbki, którą rozumiem jako zdolność do osiągnięcia wymaganych w dokumentacji wykonawczej części parametrów chropowatości i tolerancji wymiarów powierzchni, tolerancji położenia przy minimalizacji czasu obróbki i kosztów nie została w sposób wystarczający udokumentowana.

Na podstawie przygotowanej recenzji pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pana mgr inż. Macieja Kowalskiego pt. „Metodyka automatyzacji programowania obróbki specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego dla obrabiarek CNC w zintegrowanym środowisku CAD/CAM”. Stwierdzam, że praca spełnia wymagania zawarte w art. 131 Ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.



