



---

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

---

*WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ*

ROZPRAWA DOKTORSKA

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

mgr inż. Maciej Kowalski

**Promotor:**

prof. dr hab. inż. Adam Hamrol

**Promotor pomocniczy:**

dr inż. Przemysław Zawadzki

---

Poznań, 2023

---

## Streszczenie

Rozprawa podejmuje tematykę automatyzacji procesu programowania obrabiarek CNC w zintegrowanym środowisku CAD/CAM, w kontekście wytwarzania specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego. Głównym celem pracy jest opracowanie metodyki automatyzacji procesu programowania, pozwalającej w sposób proceduralny uporządkować przetwarzanie specjalistycznej wiedzy inżynierskiej oraz jej implementację w postaci szablonów obróbki, minimalizując udział inżyniera w procesie programowania obrabiarek CNC do niezbędnego minimum.

Dwa pierwsze rozdziały przybliżają tematykę zastosowania specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego w procesach wytwarzania oraz procesy ich wykonania, skupiając się na technikach obróbki skrawaniem i metodach programowania obrabiarek CNC.

Rozdział trzeci przedstawia analizę stosowanych obecnie metod automatyzacji procesu programowania obrabiarek CNC w systemach CAx, wskazując na luki metodyczne w tym obszarze. Rozdział czwarty poświęcony jest technice inżynierii wiedzy, stanowiącej podstawę budowy inteligentnych systemów komputerowych, wspierających automatyzację rutynowych zadań w procesach inżynierskich, koncentrując się na obszarze projektowania technologii i wskazując wybrane narzędzia i techniki do dalszego zastosowania.

W rozdziale piątym zdefiniowano cel i zakres pracy oraz przedstawiono plan realizacji prac badawczych. Rozdział szósty poświęcony jest opracowaniu procedury automatyzacji programowania maszyn CNC w systemach CAx pod postacią autorskiej metodyki ACPUT. W rozdziale siódmym została omówiona budowa aplikacji bazy wiedzy na potrzeby walidacji metodyki, w sposób szczegółowy opisana w rozdziale ósmym. Pracę kończy opis wniosków i kierunku dalszych prac, przedstawiony w rozdziale dziewiątym.

## Abstract

The dissertation takes up the topic of automation of the programming within a context of the manufacture of special production tooling in integrated CAD/CAM systems. The main purpose of the thesis is development of methodology of automation for the programming CNC machines in a way that allows procedural organizing in engineering knowledge as well as its implementation as a machining template thereby reducing engineer participation during programming to an indispensable minimum.

The first two chapters introduce application of special production tooling in manufacturing as well as production process mainly focus on the machining techniques and the methods of machine tools programming.

The analysis of currently used methods of automation process of machine tool programming in CAx systems is presented in chapter three also indicating the methodological gaps in this field. Chapter four is dedicated to the Knowledge Based Engineering which is the basis of intelligent computer systems and it supports automation of routine tasks in engineering as well as it indicates techniques and tools for further use.

The aim and scope of dissertation is defined in chapter five. There is also the research plan. Chapter six describes the ACPUT (Automatic CAM Programing Using Machining Templates) methodology developed by the author which enables automation of CNC machines programming in CAx systems. Chapter seven includes creation of the database application for the use of methodology validation which is fully described in chapter eight. The dissertation ends with description of conclusions and further research directions.

# Spis treści

Streszczenie .....	2
Abstract .....	<b>Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.</b>
Wykaz symboli i oznaczeń.....	6
Wprowadzenie.....	7
Rozdział 1. Specjalne oprzyrządowanie produkcyjne.....	10
1.1 Rola i znaczenie oprzyrządowania w procesie produkcyjnym.....	10
1.2 Proces wytwarzania specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego.....	14
1.3 Potrzeba automatyzacji programowania obróbki specjalnego oprzyrządowania .....	15
Rozdział 2. Programowanie obrabiarek CNC .....	17
2.1 Metody programowania obrabiarek CNC .....	17
2.2 Programowanie ręczne .....	17
2.3 Programowanie z nakładkami (dialogowe) .....	18
2.4 Programowanie w programach CAM (konwersacyjne) .....	19
Rozdział 3. Automatyzacja programowania obrabiarek CNC w systemach CAM .....	23
3.1 Charakterystyka zintegrowanych systemów CAD/CAM.....	23
3.2 Metody projektowania procesu technologicznego w systemach CAPP.....	24
3.3 Automatyzacja programowania obrabiarek CNC w systemach CAM .....	26
3.3.1 Szablony obróbkowe .....	27
3.3.2 Metody klasy Feature Recognition.....	27
3.3.3 Zastosowanie metody Feature Recognition w praktyce – case study.....	29
Rozdział 4. Projektowanie oparte na wiedzy .....	35
4.1 Inżynieria wiedzy w obszarze inżynierii projektowania .....	35
4.2 Zarządzanie wiedzą w biurze technicznym .....	36
4.3 Reprezentacja wiedzy inżynierskiej .....	37
4.4 Metodyki budowy systemów klasy KBE .....	39
4.5 Przykłady wdrożeń systemów KBE .....	42
Rozdział 5. Cel, założenia i plan pracy .....	46
5.1 Wnioski z analizy literatury .....	46
5.2 Cel i hipoteza badawcza pracy .....	47
5.3 Założenia i plan badań.....	48
Rozdział 6. Metodyka automatyzacji programowania obrabiarek CNC.....	50
6.1 Założenia do metodyki ACPUT .....	50
6.2 Etapy metodyki ACPUT .....	52
6.2.1 Etap 1 - analiza modeli 3D rodziny części oprzyrządowania specjalnego, wytypowanie reprezentanta rodziny .....	52

---

6.2.2 Etap 2 – przygotowanie karty technologicznej.....	53
6.2.3 Etap 3 – przygotowanie modeli CAD dla szablonu obróbkowego.....	53
6.2.4 Etap 4 – przygotowanie szablonu obróbki .....	54
6.2.5 Etap 5 – przygotowanie programów obróbki .....	55
6.2.6 Etap 6 – export programów obróbki na obrabiarkę CNC.....	57
Rozdział 7. Aplikacja bazodanowa wspomagająca stosowanie metodyki ACPUT.....	58
7.1 Projekt aplikacji bazodanowej.....	58
7.2 Implementacja aplikacji bazodanowej .....	59
7.3 Ocena opłacalności stosowania metodyki ACPUT .....	66
Rozdział 8. Walidacja metodyki ACPUT .....	70
8.1 Wprowadzenie.....	70
8.2 Programowanie obróbki części oprzyrządowania montażowego rur układu chłodzącego .....	71
8.2.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS1 .....	71
8.2.2 Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 1 z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	72
8.2.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 1 przez programistów .....	82
8.2.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego.....	82
8.3 Programowanie obróbki części pozycjonujących oprzyrządowania spawalniczego do spawania laserowego.....	90
8.3.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS 2 .....	90
8.3.2 Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 2 z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	91
8.3.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 2 przez programistów .....	94
8.3.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego.....	94
8.4 Programowanie obróbki części pozycjonujących oprzyrządowania spawalniczego do zgrzewania punktowego .....	100
8.4.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS 3 .....	100
8.4.2 Przygotowanie programów obróbki dla rodziny części OS 3 z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	101
8.4.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 3 przez programistów .....	103
8.4.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego.....	103
8.5 Porównanie czasów programowania i obróbki części rodzin oprzyrządowania .....	111
Rozdział 9. Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac .....	115
9.1 Wnioski ogólne.....	115
9.2 Wnioski praktyczne .....	115
9.3 Wnioski do dalszych prac.....	116
Literatura .....	118
Spis rysunków .....	125
Spis tabel .....	129

## Wykaz symboli i oznaczeń

<b>ACPUT</b>	-	<i>Automatic CAM Programming Using Machining Templates</i>
<b>AM</b>	-	<i>Additive Manufacturing</i>
<b>CAD</b>	-	<i>Computer Aided Design</i>
<b>CAE</b>	-	<i>Computer Aided Engineering</i>
<b>CAM</b>	-	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
<b>CAPP</b>	-	<i>Computer Aided Process Planning</i>
<b>CAx</b>	-	<i>Computer Aided Technologies</i>
<b>CNC</b>	-	<i>Computerized Numerical Control</i>
<b>ERD</b>	-	<i>Entity - Relationship Diagram</i>
<b>ETO</b>	-	<i>Engineering To Order</i>
<b>FR</b>	-	<i>Feature Recognition</i>
<b>ICARE</b>	-	<i>Illustration, Constraints, Activities, Rules, Entities</i>
<b>KADM</b>	-	<i>Knowledge Aided Design Methodology</i>
<b>KBE</b>	-	<i>Knowledge Based Engineering</i>
<b>KBS</b>	-	<i>Knowledge Based System</i>
<b>KE</b>	-	<i>Knowledge Engineering</i>
<b>KNOMAD</b>	-	<i>Knowledge Capture &amp; Identification of Knowledge Change Normalisation, Organisation, Modelling &amp; Implementation, Analysis and Delivery</i>
<b>MC</b>	-	<i>Mass Customization</i>
<b>MDAVP</b>	-	<i>Methodology of Design Automation of Variant Products</i>
<b>MML</b>	-	<i>Moka Modelling Language</i>
<b>MOKA</b>	-	<i>Methodology and software tools Oriented to Knowledge</i>
<b>MTO</b>	-	<i>Manufacturing To Order</i>
<b>NC</b>	-	<i>Numerical Control</i>
<b>OS</b>	-	<i>Oprządkowanie Specjalne</i>
<b>PPR</b>	-	<i>Product, Process, Resources</i>
<b>SOP</b>	-	<i>Specjalne Oprządkowanie Produkcyjne</i>
<b>TPP</b>	-	<i>Techniczne Przygotowanie Produkcji</i>
<b>UML</b>	-	<i>Unified Modeling Language</i>

## Wprowadzenie

Rozwój automatyzacji i technologii informatycznych oraz będące ich wynikiem zmiany oczekiwań konsumentów sprawiają, że w ciągu ostatnich lat zauważalnie wzrasta różnorodność wyrobów oraz skraca się czas ich życia. Przejawem tego jest coraz częstsze stosowanie strategii produkcji nazywanej masową kustomizacją (MC – ang. Mass Customization) [Zhang et al. 2019; Jost et al. 2020], której założeniem jest produkować szybko i stosunkowo tanio wyroby dopasowane do indywidualnych potrzeb klienta. Producenci muszą tym oczekiwaniom sprostać. Wymaga to od nich wprowadzania odpowiednich metod organizacji procesów, realizowanych na różnych płaszczyznach - biznesowej oraz inżynierskiej. Jednym z nich jest proces technicznego przygotowania produkcji (TPP), będący ważną częścią procesu wytwórczego. Do TPP zalicza się ogół prac związanych z opracowaniem dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej, organizacją systemu produkcji oraz jego wdrożeniem i uruchomieniem. Należy podkreślić, że, obok przygotowania konstrukcyjnego, ważnym składnikiem TPP jest przygotowanie procesu technologicznego. Dotyczy ono czynności związanych z wytwarzaniem półfabrykatów, części a także gotowych wyrobów i wpływa na sposób wykonania zaprojektowanych przez projektantów wyrobów.

Zadania w obszarze TPP są już od kilku dekad wspierane przez systemy komputerowe, a ogół stosowanych w nich programów przyjęto nazywać systemami klasy CAx (ang. Computer Aided Technologies) [Dankwort et al. 2004]. Najpopularniejszą grupę oprogramowania stanowią tu systemy klasy CAD (ang. Computer Aided Design), przeznaczone do wspomagania etapu przygotowania dokumentacji technicznej. Początek rozwoju systemów CAD sięga lat 80. XX wieku, kiedy to kilku producentów wprowadziło do sprzedaży pierwsze wersje znanych i stosowanych do dziś programów (m.in. Autodesk - AutoCAD oraz Dassault Systems - Catia), wyznaczając nowy standard w pracy konstruktorów i projektantów. Programy CAD umożliwiały szybsze, w stosunku do tradycyjnych metod projektowania, przygotowanie dokumentacji technicznej 2D. Największą ich zaletą była łatwość edycji i nanoszenie zmian na rysunkach. W latach 90-tych pojawiła się możliwość projektowania w systemach CAD z wykorzystaniem modelowania przestrzennego (modelowanie 3D), dzięki któremu projektanci oraz zespoły projektowe otrzymały zupełnie nowe możliwości. Łatwiejsze stało się projektowanie skomplikowanych wyrobów, ich zespołów i części, a także analiza samego projektu, a co za tym idzie możliwość wykrycia błędów konstrukcyjnych we wczesnych etapach procesu projektowania. Programy CAD

wspierały już nie tylko etap przygotowania dokumentacji technicznej 2D, ale bardziej kompleksowo pomagały inżynierom, obejmując projektowanie koncepcyjne i rozwój wyrobu. Rozpowszechnienie systemów klasy CAD zaowocowało w następnych latach opracowaniem grupy narzędzi, wspomagających inżynierów. Powstały m.in. rozwiązania klasy CAE (ang. Computer Aided Engineering), pomagające np. wykonać analizę wytrzymałościową konstrukcji lub przeprowadzić symulację kinematyczną mechanizmów. Ponadto postęp technologiczny i powszechność stosowania w procesach produkcji obrabiarek CNC (ang. Computerized Numerical Control) doprowadziły do powstania systemów klasy CAM (ang. Computer Aided Manufacturing) do programowania obrabiarek CNC.

Ponieważ dane wsadowe do systemów klasy CAM pochodzą przeważnie z programu CAD, naturalnym stało się połączenie tych dwóch obszarów w jedno środowisko projektowe. Zintegrowane systemy CAD/CAM są dziś powszechne i pozwalają z coraz większą sprawnością realizować prace z zakresu TPP.

Powszechność i popularyzacja zintegrowanych systemów CAx doprowadziły do dynamicznego rozwoju metod projektowania. Wśród nich istotną rolę odgrywa tzw. projektowanie oparte na wiedzy - KBE (ang. Knowledge Based Engineering), w którym inżynierowie mają możliwość tworzenia, upowszechniania i wykorzystania wiedzy w sformalizowany sposób [Verhagen et al. 2012, Górski et al. 2016, Kugler et al., 2023]. Specjalne, dedykowane konkretnym zagadnieniom, narzędzia informatyczne pozwalają projektantom elastycznie reagować na wymagania klientów, a jednocześnie standaryzować stosowane w przedsiębiorstwie rozwiązania techniczne. Systemy CAx zintegrowane z KBE ułatwiają analizę wymagań, wspomagają podejmowanie decyzji, a dzięki automatyzacji powtarzalnych i rutynowych zadań, skracają czas rozwoju nowego wyrobu. Przykłady takich rozwiązań znane są w wielu branżach produkcyjnych, w tym motoryzacji, elektronice czy budownictwie [Pinfeld 2001, Rivera et al. 2020, Kolletzki et al. 2022, Day et al. 2019].

Do dziś powstało wiele wzorców metodycznych, wspierających budowę systemu KBE (np. CommonKADS, MOKA czy KADM), opierających się o repozytoria, bazy danych a nawet sztuczną inteligencję [Schreiber 2008, Reddy et al. 2015, Skarka 2010]. Należy jednak podkreślić, że metody projektowania oparte na wiedzy (nazywane także - inteligentnym projektowaniem) są głównie stosowane w kontekście projektowania konstrukcji wyrobu, a tym samym są silnie powiązane z systemami CAD. Natomiast brakuje przykładów zastosowania metod KBE w projektowaniu technologii z wykorzystaniem systemów CAM [Kowalski et al. 2022]. Brak wzorców metodycznych sprawia, że automatyzacja



---

programowania obrabiarek CNC nie jest stosowana w praktyce, pomimo, że biura techniczne są już w posiadaniu odpowiednich narzędzi informatycznych, pozwalających taką automatyzację opracować.

W dobie wymagań stawianych współczesnym przedsiębiorstwom, związanych z masową personalizacją i częstą zmiennością asortymentu produktów, podejmowanie działań, prowadzących do doskonalenia procesów projektowania i wytwarzania wyrobów jest wyzwaniem o szczególnym znaczeniu [Hamrol 2018]. W niniejszej pracy podjęto tę problematykę w odniesieniu do automatyzacji programowania obróbki skrawaniem specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego (SOP w skrócie - oprzyrządowanie specjalne OS). W pierwszej części przedstawiono opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego i metod jego wytwarzania, ze szczególnym uwzględnieniem procesów obróbki skrawaniem. W części teoretycznej przedstawione zostały również metody programowania obrabiarek CNC, w tym programowanie w systemach CAM oraz możliwości automatyzacji tych zadań w kontekście procesu wytwarzania specjalnego oprzyrządowania. Następnie dokonano przeglądu metod i narzędzi z dziedziny inżynierii wiedzy, jako podstaw budowy systemów klasy KBE. Pierwsza część pracy kończy się definicją celu pracy oraz przedstawieniem planu badań. Druga część pracy rozpoczyna się prezentacją autorskiej metodyki ACPUT (ang. Automatic CAM Programming Using Machining Templates), w której opisano i uzasadniono etapy budowy systemu klasy KBE do automatyzacji programowania obrabiarek CNC w zintegrowanym środowisku CAD/CAM. Następnie opisano projekt i budowę specjalnej aplikacji bazy wiedzy do obsługi procesu przetwarzania wiedzy technologicznej na potrzeby opracowanej metodyki. Korzystając z założeń metodyki ACPUT oraz aplikacji bazy wiedzy, zaprezentowano wyniki prac walidacyjnych, polegających na automatyzacji programowania obróbki CAM dla trzech różnych rodzin OS. Na koniec przedstawiono wnioski z pracy oraz wskazano kierunki dalszych działań.

---

# Rozdział 1.

## Specjalne oprzyrządowanie produkcyjne

### 1.1 Rola i znaczenie oprzyrządowania w procesie produkcyjnym

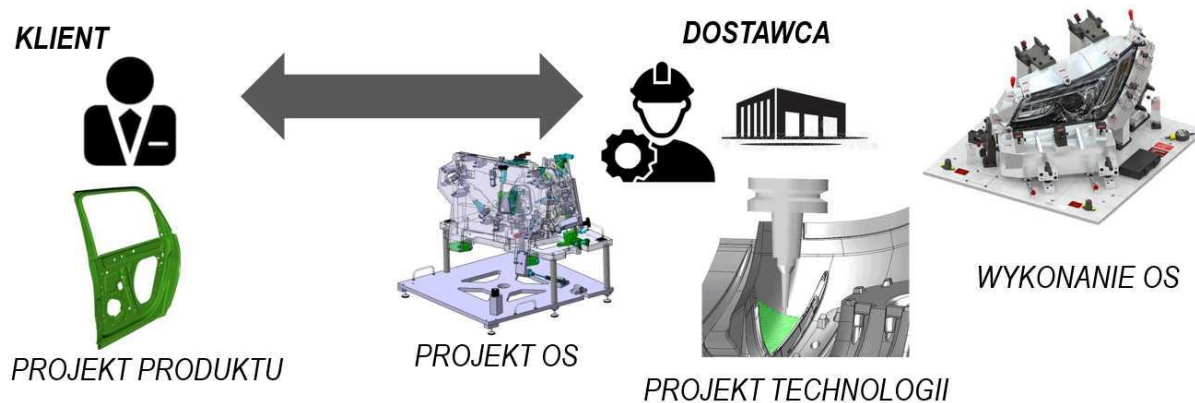
Oprzyrządowanie produkcyjne obejmuje środki techniczne i narzędzia stanowiące uzupełnienie wyposażenia maszyn i urządzeń, niezbędne do wytworzenia określonych wyrobów lub wykonania danej operacji technologicznej [Pająk 2021]. Oprzyrządowaniem produkcyjnym są więc wszelkiego rodzaju formy (wtryskowe, odlewnicze), wykrojniki, tłoczniaki, przyrządy spawalnicze czy przyrządy pomiarowe i sprawdzające. Ze względu na ich przeznaczenie rozróżnia się oprzyrządowanie uniwersalne (ogólnego zastosowania) oraz oprzyrządowanie specjalne (OS), dedykowane konkretnym procesom, maszynom, lub wyrobom [Szatkowski 2014]. W procesie ich projektowania i wytwarzania należy uwzględniać spełnianie wymagań jakościowych, a także względy ekonomiczne. Koszt wykonania oprzyrządowania specjalnego może być bowiem stosunkowo wysoki (skomplikowane formy wtryskowe czy matryce mogą kosztować nawet ponad 1 mln PLN). Przykładem jest branża motoryzacyjna, w której OS znajduje zastosowanie nie tylko w procesach wytwarzania części, ale także w procesach końcowego montażu. Praktycznie wszystkie części samochodu produkowane są przy zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego, a ze względu na ich skomplikowane kształty oraz gabaryty koszt ich wykonania jest zazwyczaj bardzo wysoki. Duża liczba wariantów pojazdu, a co za tym idzie również, części z których się składa, sprawia, że proces wytwarzania OS stanowi w przemyśle motoryzacyjnym przedmiot wielu prac udoskonalających, rozwojowych i badawczych [Leal et al. 2017, Lacerda et al. 2016, Sarfraz et al. 2021].

Proces wytwarzania OS może być realizowany przez przedsiębiorstwo produkcyjne we własnym zakresie, pod warunkiem, że dysponuje ono odpowiednimi zasobami. Zazwyczaj wymaga to prowadzenia odpowiednio rozbudowanego, osobnego działu narzędziowni<sup>1</sup>. Powszechną w przemyśle praktyką jest również kooperacja przedsiębiorstwa produkującego wyrób finalny (klient) i producenta (dostawcy) oprzyrządowania specjalnego (rys. 1.1). Projekt wyrobu, do produkcji którego OS jest przeznaczone, jest zazwyczaj wykonywany przez klienta.

---

<sup>1</sup> W niektórych przedsiębiorstwach dział narzędziowni może dysponować własnym zapleczem konstrukcyjnym i technologicznym, stanowiąc niejako samodzielne biuro techniczne;

Projekt oprzyrządowania jest zadaniem dostawcy OS (choć może być też realizowany przez klienta). Natomiast projekt technologii oraz wykonanie OS są już zazwyczaj zadaniem dostawcy.



Rys. 1.1 Podstawowe zadania realizowane w procesie wytwarzania OS [opracowanie własne]

Praktyka taka jest powszechna np. w branży motoryzacyjnej, ponieważ ze względu na masową skalę produkcji oraz wysoki stopień złożoności konstrukcji samochodu (składa się on średnio z ok. 12 tys. części), szacuje się, że aż około 85% części nie jest wytwarzanych przez producenta pojazdu a właśnie przez firmy współpracujące [Klier et al. 2008, Ambe et al. 2010, Lempp et al. 2022, Masoumi 2019]. Sprawdzeni producenci OS współpracują z biurem technicznym producenta pojazdu (ewentualnie z jego dostawcami), wykonując i dostarczając na linie produkcyjne gotowe OS, na którym produkowane lub montowane są poszczególne podzespoły.

Branża motoryzacyjna, nie jest jednak jedynym przykładem współpracy według schematu pokazanego na rysunku 1.1. Występuje ona w wielu innych gałęziach przemysłu, np. w produkcji wyrobów i systemów sanitarnych, produkcji wyrobów spożywczych [Fujiwara 2022, Kodzaga et al. 2022], medycznych [Dachyar et al. 2019], czy elektronicznych [Włazak et al. 2019].

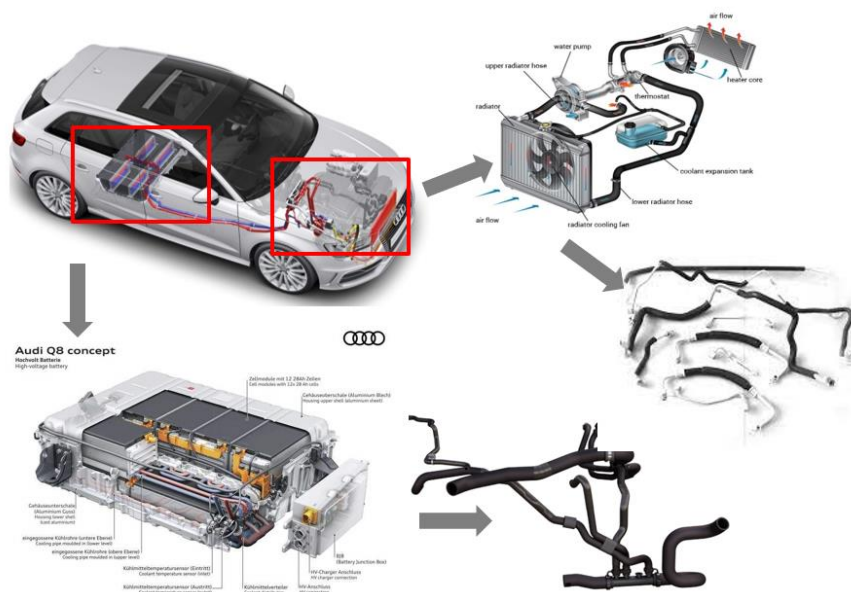
Charakter wytwarzania oprzyrządowania specjalnego ma też wpływ na strefę biznesową współpracujących ze sobą przedsiębiorstw (często w wymiarze lokalnego rynku). Taka współpraca przyczynia się do wymiany doświadczeń, zapewnia transfer wiedzy, stymuluje modernizację parków maszynowych i wpływa na rozwój stosowanych technologii wytwarzania, nie tylko u dużych firm – producentów, ale też znacznie mniejszych - dostawców.

Na organizację procesu projektowania oraz wytwarzania OS mają istotny wpływ takie czynniki jak długość cyklu życia wyrobu oraz masowa kastomizacja produktów. Cykl życia wyrobu, ze względu na wymagania rynku, staje się coraz krótszy [Zawadzki et al. 2016]. Producenci często zmieniają asortyment produkcji dostosowując go do indywidualnych wymagań klientów, co z kolei wymaga produkcji wyrobów w wielu różnych wariantach [Sabadka et al. 2019]. W przypadku samochodów klienci mogą dostosowywać je do indywidualnych preferencji, wybierając różne ich konfiguracje. Niestety, cechy konfiguracyjne produktu w istotny sposób wpływają na poziom skomplikowania procesów obróbki i montażu. Skalę tego oddziaływania zilustrowano na rysunku 1.2. Przedstawiono na nim rodzinę części samochodu typu „rura”<sup>2</sup>. Części tego typu są stosowane w wielu układach samochodu np. w układzie chłodzenia silnika (baterii w przypadku pojazdu elektrycznego), w układzie ogrzewania, klimatyzacji, hamulcowym czy też wycieraczek i spryskiwaczy. Wybór cech konfiguracyjnych samochodu, na przykład rodzaju napędu (elektryczny, spalinowy), mocy silnika, pojemności baterii itp., przekłada się na rodzaje zastosowanych rur, ich parametry i kształt. W efekcie zachodzi konieczność przygotowania wielu (w skrajnych przypadkach nawet kilkuset) wariantów rur tylko dla jednego modelu pojazdu. Uwzględniając, że dany rodzaj OS jest dedykowany zazwyczaj tylko dla danego wariantu wyrobu (tutaj rury) i w dodatku oddzielnie dla różnych operacji technologicznych (np. wytwarzania, montażu czy kontroli), to można założyć, że tylko w przypadku jednego typu części proces wytwarzania będzie wymagać przygotowania kilkuset różnych OS.

---

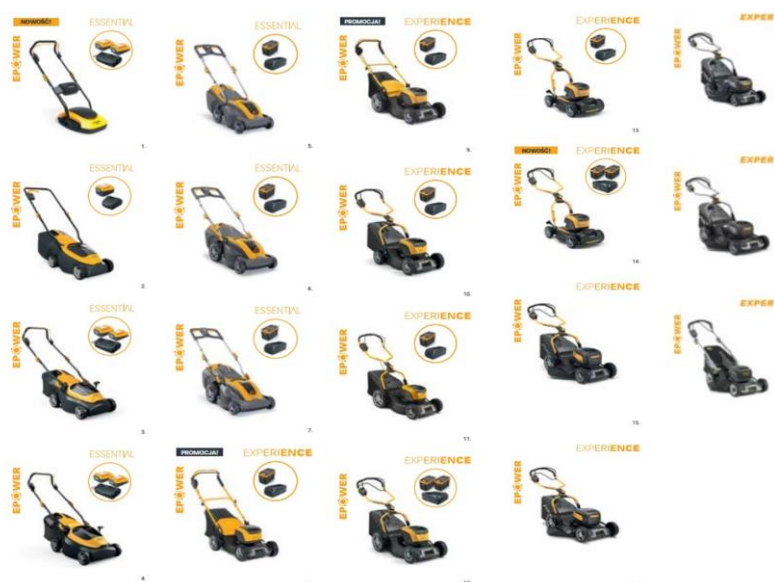
<sup>2</sup> Na potrzeby rozważań zastosowano uproszczenie, nie stosując podziału na funkcję, jaką dana rura pełni, na materiał z jakiego jest wykonana oraz szczegóły procesu jej wytwarzania.

Część typu „rura” jest też przedmiotem badań walidacyjnych procesu automatyzacji wytwarzania OS (patrz rozdział 8.2)



Rys. 1.2 Skala skomplikowania wariantów OS na przykładzie rur samochodu osobowego [opracowanie własne]

Innym przykładem masowej kastomizacji choć w mniejszej skali i o innym charakterze (tzw. kastomizacji transparentnej), gdy producenci sami decydują o wariantach konfiguracji oferowanym klientom [Wakoya et al. 2015], mogą być elektronarzędzia, np. rodzina kosiarek różniących się typem silnika, napędem, zakresem roboczym, wyposażeniem dodatkowym (rys. 1.3).



Rys. 1.3 Przykład transparentnej masowej kastomizacji – warianty kosiarek [opracowanie własne]

Projektowanie OS pozwalające spełnić założenia i oczekiwania masowej kastomizacji jest wyzwaniem dla całego przedsiębiorstwa, począwszy od działań marketingowych poprzez logistykę, a skończywszy na biurach technicznych, gdzie inżynierowie jednocześnie projektują cały wielowariantowy typoszereg wyrobów i oprzyrządowanie do ich produkcji. Tradycyjne podejście do projektowania (tzn. definicja problemu, poszukiwanie rozwiązania, koncepcja i opracowanie, wykonanie, testy i walidacja) okazuje się w takim przypadku nieefektywne [Kowalski et al. 2019]. Przy projektowaniu rodziny części należy do tych działań podejść inaczej, badając potencjalną zmienność w obszarze całej grupy, określając zakresy wartości charakterystycznych (konfigurowalnych) parametrów i ich wpływ na pozostałe cechy. Celem jest osiągnięcie wysokiej wydajności projektowej, oznaczającej krótki czas projektowania, standaryzację stosowanych rozwiązań (technologiczność konstrukcji) i możliwie najwyższe podobieństwo konstrukcyjne, tak aby wytworzenie różnych wariantów w obrębie danej rodziny nie przerodziło się „w projektowanie na zamówienie”. Istotą jest więc wyznaczenie reguł konstrukcyjnych i technologicznych, które będą prawdziwe dla każdego wariantu części, należącego do danej rodziny. Dlatego też w takich działaniach z pomocą przychodzą techniki projektowania opartego na wiedzy (KBE), które najogólniej - pozwalają na identyfikację, uporządkowanie i odpowiedni zapis stosowanej w procesie projektowania wiedzy.

## **1.2 Proces wytwarzania specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego**

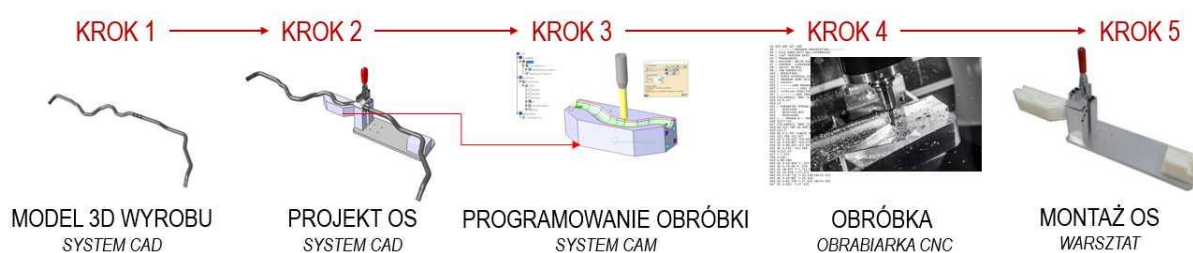
Wytwarzanie specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego jest zazwyczaj odpowiedzią na potrzeby realizacji produkcji na zamówienie – ETO (ang. Engineering to Order). Konstrukcja i technologia są opracowywane dla konkretnego zlecenia w oparciu o dostarczoną przez zamawiającego dokumentację (w formie: dokumentacji 2D, modelu 3D lub prototypu, który jest poddawany digitalizacji).

W wytwarzaniu oprzyrządowania specjalnego jest stosowanych wiele technik kształtowania i obróbki . Do najczęściej stosowanych zaliczyć należy obróbkę skrawaniem, obróbkę elektroerozyjną, odlewanie, spawanie a także techniki przyrostowe. Obróbka skrawaniem jest zaliczana do najbardziej wydajnych sposobów wytwarzania części, gotowych wyrobów (dla małych i średnich serii), a także narzędzi produkcyjnych (tutaj najczęściej produkcja jednostkowa). Obecnie realizowana jest głównie na obrabiarkach CNC, a konwencjonalne obrabiarki stanowią zazwyczaj jedynie awaryjne zaplecze techniczne. Pomimo coraz szerzej stosowanych w przemyśle technologii przyrostowych (dynamicznie rozwijająca się technologia druku 3D) [Sarvankar et al. 2019, Chantzis et al. 2020], to

technologie ubytkowe (w tym głównie właśnie obróbka skrawaniem) nadal pozwalają na uzyskiwanie najwyższej dokładności wymiarowej.

Proces wytwarzania OS poprzez obróbkę skrawaniem realizowany jest etapami i obejmuje (rys. 1.4):

1. Analizę modelu 3D wyrobu dostarczonego przez klienta.
2. Projekt oprzyrządowania specjalnego, dostosowanego do kształtu wyrobu.
3. Programowanie obróbki dla poszczególnych części oprzyrządowania.
4. Obróbkę części oprzyrządowania na obrabiarce CNC.
5. Montaż oprzyrządowania i dostawa do klienta.



Rys. 1.4 Proces wytwarzania OS w zintegrowanym środowisku CAD/CAM [opracowanie własne]

### 1.3 Potrzeba automatyzacji programowania obróbki specjalnego oprzyrządowania

Coraz większa wariantowość produkcji, będąca efektem postępującej masowej kastomizacji, wymusza poszukiwanie i wdrażanie nowych metod w obszarze projektowania i wytwarzania wyrobów. Na znaczeniu zyskują przede wszystkim różnorodne metody automatyzacji tych procesów, czemu sprzyjają nowoczesne, zintegrowane systemy klasy CAX. Automatyzacja prac realizowanych w biurach technicznych jest więc praktyką coraz powszechniejszą, ale obejmującą głównie projektowanie wyrobów, a nie projektowanie technologii czy tym bardziej - specjalistycznych zadań programowania obróbki. Wspomniane we wprowadzeniu oraz opisane szerzej w rozdziale 4 metody i narzędzia z zakresu inżynierii wiedzy (KBE) stosowane są zazwyczaj właśnie w kontekście prac konstrukcyjnych, prowadzonych w systemach CAD. Podobnych działań obejmujących programowanie obróbki jest wyraźnie mniej. Wydaje się, że wpływ na taki stan może mieć złożoność i poziom trudności tych prac.

Praktyka pokazuje, że jeśli wytwarzanie części OS jest przeprowadzane z zastosowaniem obróbki skrawaniem na obrabiarkach CNC, programowanie obróbki jest czasochłonne

i wymaga zaangażowania inżynierów o wysokich kwalifikacjach. Z tego powodu programowanie obróbki oprzyrządowania specjalnego wpływa w znacznym stopniu na całkowite koszty wytwarzania. Rachunek ekonomiczny może być więc jednym z powodów, dla których warto podjąć temat automatyzacji programowania obróbki specjalnego oprzyrządowania. Za podjęciem rozważań w zakresie automatyzacji programowania CAM specjalnego oprzyrządowania przemawia również to, że programowanie obróbki charakteryzuje się wysokim stopniem powtarzalności wykonywanych czynności, szczególnie w przypadku programowania obróbki rodzin części. Podobieństwo to jest wyraźne nawet przy definiowaniu zabiegów o różnym przeznaczeniu (np. cykl frezowania kieszeni, wiercenia otworów czy frezowania po krzywej). W każdym z nich należy wykonać te same czynności, związane ze: wskazaniem konkretnych elementów geometrycznych modelu 3D (np. powierzchni, konturów, itp.), doбором narzędzia skrawającego, ustaleniem strategii obróbki, sposobem poruszania się narzędzia oraz ustaleniem parametrów obróbki. Różnice występują tylko w szczegółowym opisie zabiegów.

Tak przedstawiona problematyka automatyzacji programowania obróbki części specjalnego oprzyrządowania w systemach CAM związana jest z następującymi pytaniami:

- jakie kroki (w ujęciu proceduralnym) należy wykonać, aby opracować skuteczny system automatyzacji programowania obróbki w środowisku CAM?

- jakie narzędzia systemu CAM i w jaki sposób należy zastosować, aby automatyzować poprawne definiowanie zabiegów obróbki?

- w jaki sposób skutecznie pozyskiwać, zapisywać, a następnie stosować wiedzę programistów/technologów w procesie programowania CAM?

Kierując się tymi pytaniami w dalszej części pracy przeanalizowano metody programowania obrabiarek CNC oraz dokonano przeglądu metody automatyzacji dostępnych w zintegrowanych systemach CAx oraz narzędzi z zakresu inżynierii wiedzy.



## Rozdział 2.

# Programowanie obrabiarek CNC

## 2.1 Metody programowania obrabiarek CNC

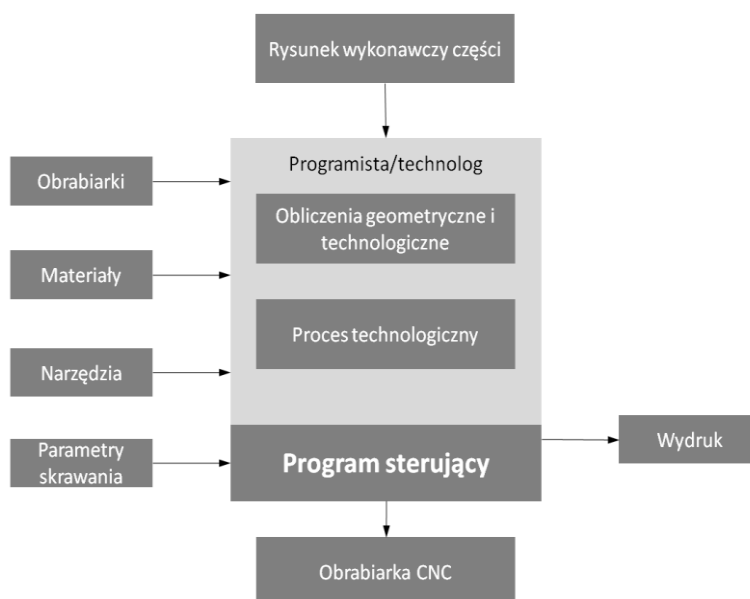
Programowanie obrabiarek CNC polega na opracowaniu i zapisaniu w formie cyfrowej danych, opisujących przebieg procesu obróbki a także wartości parametrów, z jakimi obróbka jest realizowana. Powstaje w ten sposób program obróbki będący zapisem kolejnych operacji, zabiegów i przejść w całym procesie obróbki.

W literaturze wyróżnia się następujące metody programowania obrabiarek CNC [Habrat 2007]:

- programowanie ręczne,
- programowanie z nakładkami (dialogowe),
- programowanie w programach CAM (konwersacyjne).

## 2.2 Programowanie ręczne

W przypadku programowania ręcznego (rys. 2.1) program obróbki tworzony jest bezpośrednio na obrabiarce, w języku i formacie zgodnym z jej układem sterowania. Operator obrabiarki, korzysta z karty technologicznej oraz tablic materiałowych, dokumentacji obrabiarki oraz katalogów narzędzi.



Rys. 2.1 Schemat programowania ręcznego [na podstawie Habrat 2007]

Programowanie ręczne charakteryzuje się tworzeniem kodu programu sterującego NC (ang. Numerical Control) zgodnie z normą DIN 66025 lub ISO 6983 (tzw. "G code", rys. 2.2) [Latif et al. 2021]. Stosuje się go najczęściej dla części o prostszych kształtach, niewymagających skomplikowanych torów ruchu narzędzia. W przypadku programowania ręcznego można wykorzystywać zmienne lub struktury sterujące przebiegiem programu (np. instrukcje warunkowe, pętle programowe).

```

N10 G00 G49 G40.1 G17 G80 G50 G90
N20 G20
N30 (2 1/2 Axis Profiling)
N40 M6 T1
N50 M03 S5000
N60 G00 Z0.250
N70 X1.482 Y2.408
N80 G01 X1.482 Y2.408 Z-0.125 F35.0
N90 G17
N100 G03X1.018Y2.592I-0.232J0.092 F45.0
N110 X1.482Y2.408I0.232J-0.092
N120 G00 Z0.250
N130 X1.482 Y2.408
N140 Z0.250
N150 X2.959 Y1.787
N160 G01 X2.959 Y1.787 Z-0.125 F35.0
N170 G03X3.155Y1.512I1.326J0.735 F45.0
N180 X2.959Y1.787I1.096J0.986
N190 G00 Z0.250
N200 X2.959 Y1.787
N210 Z0.250
N220 X7.028 Y2.385
N230 G01 X7.028 Y2.385 Z-0.125 F35.0
N240 G03X7.472Y2.615I0.222J0.115 F45.0
N250 X7.028Y2.385I-0.222J-0.115
N260 G00 Z0.250
N270 X7.028 Y2.385
N280 (2 1/2 Axis Profiling)
N290 Z0.250
N300 X1.437 Y0.998
N310 G01 X1.437 Y0.998 Z-0.125 F35.0

```

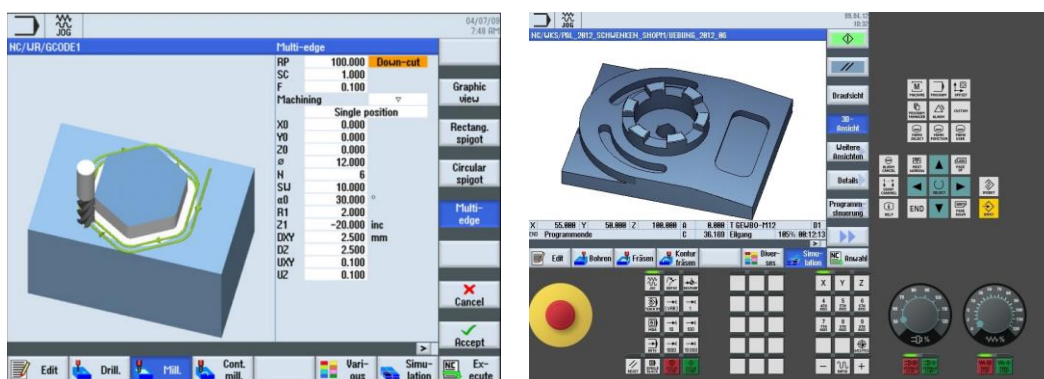
Rys. 2.2 Przykład kodu sterującego w formacie G [opracowanie własne]

### 2.3 Programowanie z nakładkami (dialogowe)

W latach 90. XX wieku producenci obrabiarek CNC zaczęli dostarczać na rynek specjalne oprogramowanie mogące być instalowane zarówno na obrabiarce jak i na komputerach (programowanie offline), zwane potocznie nakładkami [Petrus et al. 2019]. Przykładem takich programów są wprowadzone w przez firmę Siemens nakładki „ShopMill” (rys. 2.3) [SinuTrain 2006] oraz „ShopTurn” [SinuTrain 2010] czy nakładki umożliwiające programowanie dialogowe w układach sterujących firmy Heidenhain [Heidenheim 2019].

Programowanie dialogowe charakteryzuje się tworzeniem kodu programu sterującego NC w wygodnym dla użytkownika interaktywnym środowisku [Pritschow et al. 1987]. Podczas tworzenia zabiegów obróbki korzysta się z predefiniowanych cykli obróbki, dla których wartości parametrów wprowadza się w oparciu o interfejs graficzny, zubożony obrazami. Zaletą programowania dialogowego jest również możliwość wykonania symulacji obróbki.

Programowanie dialogowe znajduje zastosowanie głównie w małych warsztatach, narzędziowniach i przedsiębiorstwach produkcyjnych, które charakteryzuje duża zmienność obrabianych części oraz produkcja jednostkowa i małoseryjna.



Rys. 2.3 Nakładka „Shopmill” wspomagająca programowanie [SinuTrain 2006]

## 2.4 Programowanie w programach CAM (konwersacyjne)

Programowanie metodą z wykorzystaniem programu CAM<sup>3</sup>, nazywane obecnie także tradycyjnym lub konwersacyjnym, polega na opracowaniu kodu sterującego obrabiarką CNC, najczęściej na podstawie danych przygotowanych wcześniej w programie CAD (w postaci rysunków 2D lub modeli 3D) [Lee 1999]. Systemy te umożliwiają przygotowanie oraz weryfikację programów obróbki w trybie offline. Powszechna integracja środowisk CAD i CAM powoduje, że jest to najwydajniejszy sposób programowania obrabiarek CNC [Zaborski et al. 2007, Grzesik et al. 2020]. Dzięki tym zaletom metody programowania ręcznego oraz dialogowego są aktualnie coraz rzadziej stosowane.

Programowanie z wykorzystaniem systemów klasy CAM charakteryzuje się dwuetapowym przetwarzaniem danych. W pierwszym etapie tworzone są tzw. dane pośrednie, które opisują szczegółowy przebieg procesu obróbki [Tagowski et al. 2016]. Na podstawie karty technologicznej i modelu CAD przedmiotu obrabianego, tworzy się strukturę procesu obróbki definiując w systemie CAM kolejne operacje i zabiegi (rys. 2.4). Praktycznie, przygotowanie programu sterującego wymaga opracowania modelu 3D przedmiotu obrabianego w odpowiednim systemie CAD (ewentualnie – import modelu, dostarczonego np. przez klienta). Przygotowany model 3D importuje się następnie do systemu CAM lub odpowiedniego modułu, w przypadku rozwiązań zintegrowanych. Kolejnym krokiem jest

<sup>3</sup> W niektórych starszych publikacjach programowanie obrabiarek CNC z wykorzystaniem oprogramowania CAM lub zintegrowanych systemów CAD/CAM nazywane jest programowaniem zautomatyzowanym [np. Habrat 2007, Feld 2003]].

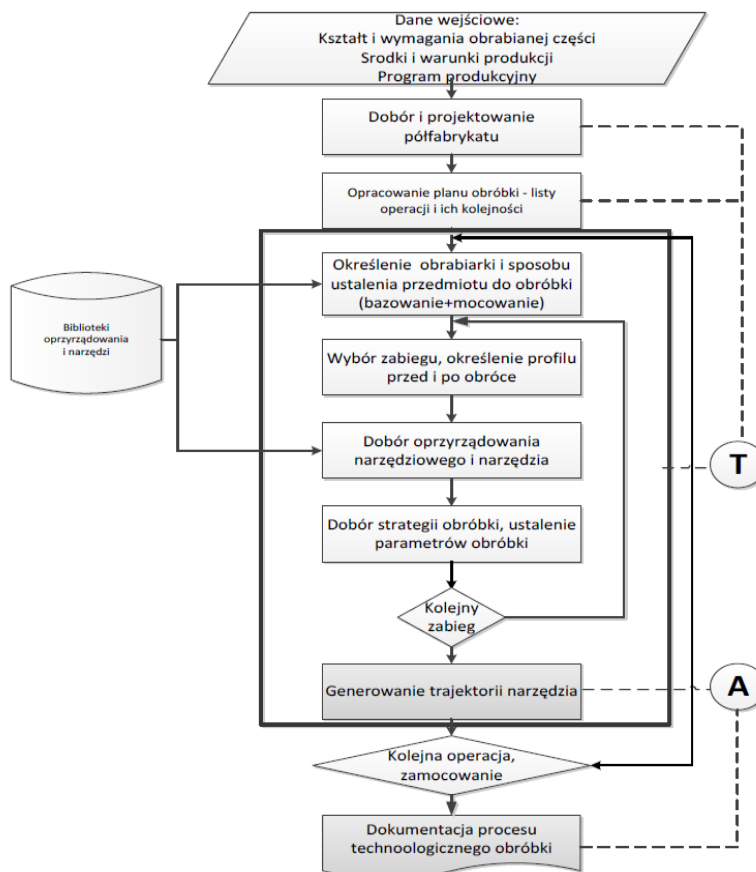
---

import lub utworzenie modelu półfabrykatu. Następnie należy określić konkretną obrabiarkę, na której będzie przeprowadzana obróbka oraz jej parametry (liczba sterowanych osi, wielkość stołu obróbczego, wartości przesuwów osiowych, itp.), a także sposób mocowania i ustawienia przedmiotu w przestrzeni roboczej obrabiarki (bazowanie). Kolejnym etapem jest określenie struktury programu obróbki z podziałem na operacje i zabiegi. Liczba operacji oraz zabiegów zależy od stopnia skomplikowania obrabianej części i jej wielkości. Przy każdym z zabiegów definiuje się geometrię (rys 2.5), opisującą cechę geometryczną<sup>4</sup> (za pomocą elementów geometrycznych<sup>5</sup>), narzędzie (np. rodzaj, wymiary) a także strategię (np. tor ruchu narzędzia) i parametry obróbki (np. prędkość, głębokość, szerokość skrawania). Na podstawie tych danych program CAM generuje trajektorię narzędzi w poszczególnych zabiegach obróbki. Systemy CAM umożliwiają weryfikację i ocenę poprawności wygenerowanych trajektorii narzędzi poprzez wykonanie symulacji obróbki. Symulacja ułatwia wykrycie kolizji narzędzia z półfabrykatem, elementami mocującymi lub elementami obrabiarki podczas programowania obróbki.

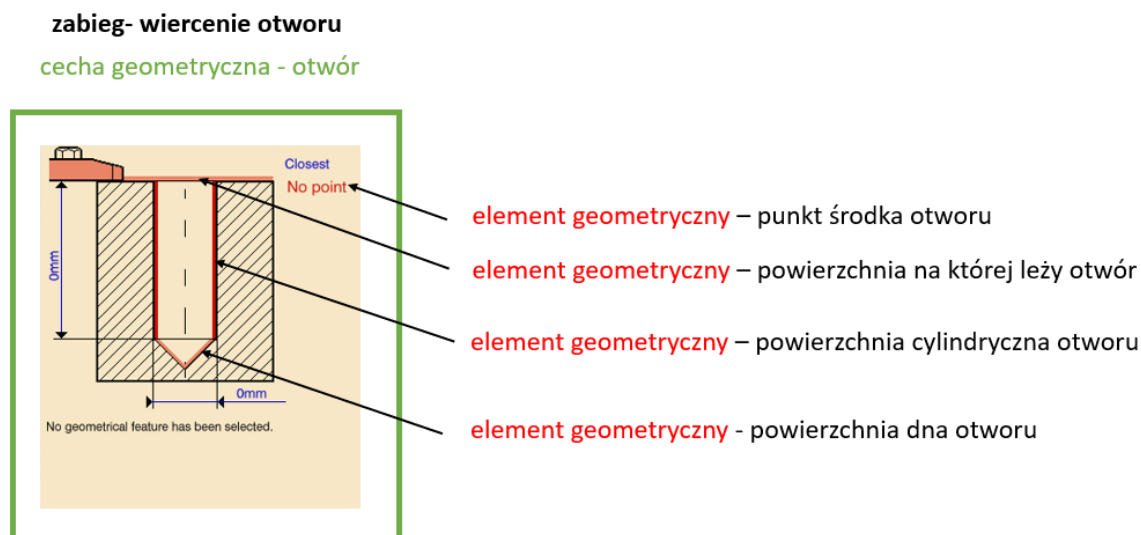
---

<sup>4</sup> Cechy geometryczne oznaczają atrybuty części takie jak: otwory, kieszenie, fazowania, zaokrąglenia, czopy.

<sup>5</sup> Elementy geometryczne oznaczają elementy modelu 3D takie jak powierzchnie, krawędzie, punkty, linie, okręgi umożliwiające zdefiniowanie cech geometrycznych części. Na przykład do zdefiniowania otworu potrzebny jest: punkt środka, oś, okrąg wyznaczający średnicę, powierzchnia boczna otworu oraz powierzchnia dna otworu.



Rys. 2.4 Przebieg procesu projektowania procesów technologicznych obróbki w systemie CAD/CAM. T-zakres działań realizowanych przez technologa, A-zakres działań realizowanych przez komputer [Duda 2013]



Rys. 2.5 Definiowanie geometrii dla zabiegu w systemie CATIA [opracowanie własne]

W drugim etapie programowania obróbki, na podstawie danych pośrednich, przy zastosowaniu tzw. postprocesor'a<sup>6</sup>, następuje adaptacja danych do wymagań układu sterowania konkretnej obrabiarki - tworzony jest właściwy program sterujący wybraną obrabiarką CNC.

Programowanie konwersacyjne ma wiele zalet w stosunku do programowania ręcznego oraz dialogowego. Przede wszystkim realizowane jest „poza obrabiarką” co korzystnie wpływa na podniesienie wydajności produkcji. Metoda programowania z wykorzystaniem programu CAM umożliwia także opracowanie programów obróbki niemożliwych do wykonania podczas programowania ręcznego lub dialogowego (powierzchnie 3D, kontury w postaci krzywych typu spline) oraz ich weryfikację. Stała się metodą powszechnie używaną i posiada wysoki potencjał w zakresie jej automatyzacji.

---

<sup>6</sup> *Postprocesorem nazywa się specjalny program (translator), pozwalający na zamianę kodu programu obróbkowego przygotowanego w danym programie CAM na język sterowania konkretnej obrabiarki CNC.*

---

## Rozdział 3.

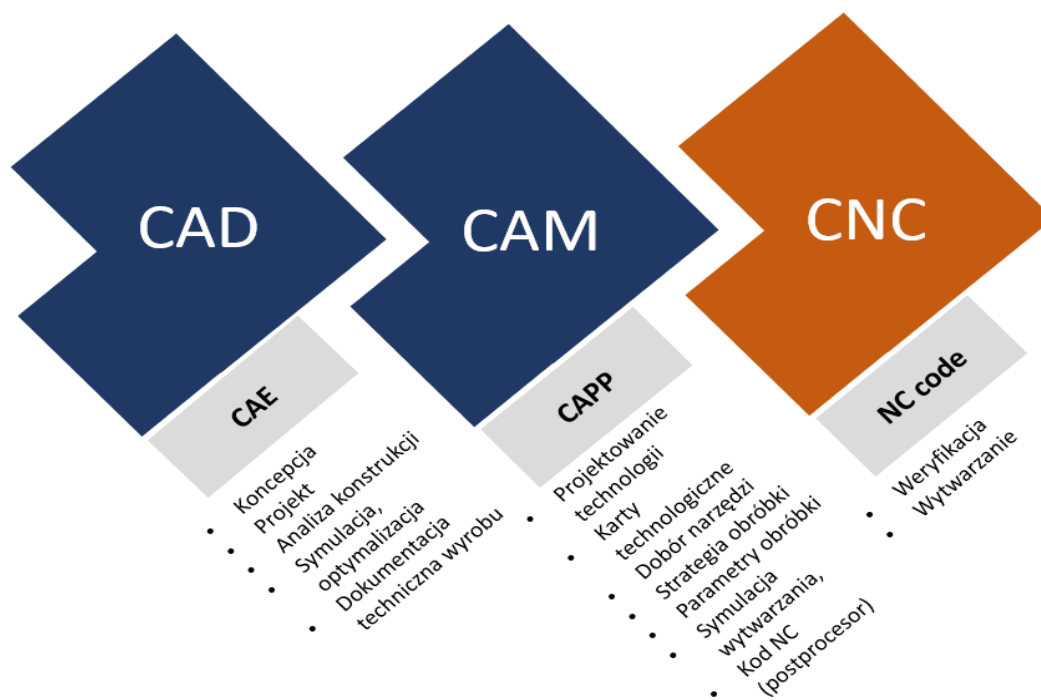
# Automatyzacja programowania obrabiarek CNC w systemach CAM

### 3.1 Charakterystyka zintegrowanych systemów CAD/CAM

Zintegrowane systemy CAD/CAM umożliwiają projektowanie konstrukcji oraz technologii w jednym środowisku programowym. Systemy te posiadają wspólny interfejs obsługi zarówno dla modułu CAD jak i CAM. Zapewniają one pełną asocjatywność wymiany danych z modułu CAD do CAM i odwrotnie (praca na natywnych formatach danych).

Zaletą zintegrowanych systemów CAD/CAM, w stosunku do systemów autonomicznych, jest możliwość powiązania cech geometrycznych przygotowanego module CAD modelu 3D z programem obróbki w module CAM. Powiązanie to umożliwia zastosowanie rozwiązań automatyzujących programowanie obróbki np. automatyczny dobór cyklu wiercenia w module CAM na podstawie otworu wykonanego dedykowaną funkcją w module CAD [Esan et al. 2013]. Takie rozwiązania są praktycznie niemożliwe do zastosowania w przypadku importu do systemu CAM modelu 3D w uniwersalnym formacie (np. ".stp", ".stl", ".iges"), ponieważ ten nie przenosi informacji o sposobie modelowania i parametrach modelu CAD w taki sposób, aby w systemach CAM była możliwość zastosowania rozwiązań automatyzujących programowanie obróbki [Mohamad et al. 2018].

Aby uzyskać większą efektywność projektowania konstrukcyjno-technologicznego, należy doprowadzić do uzyskania większej integracji ww. systemów CAD/CAM z systemami klasy CAPP (ang. Computer Aided Process Planning) [Zhou et al. 2021, Soori et al. 2021] (rys. 3.1). Zadaniem systemów CAPP jest określenie struktury procesu technologicznego obróbki - określenia kolejności poszczególnych operacji technologicznych, koniecznych do wytworzenia danej części [Duda 2013]. Efektem jest więc sekwencja operacji (oraz zabiegów), opisana w formie karty technologicznej [Xu et al. 2011, Duda et al. 2013]. W niektórych przedsiębiorstwach zadania systemów realizowane są przez rozbudowane arkusze kalkulacyjne czy aplikacje bazodanowe. Niemniej, uznaje się, że systemy CAPP powinien posiadać zdolność do projektowania procesów technologicznych obróbki dla szerokiego spektrum części maszyn, a także projektowania procesów technologicznych obróbki przy uwzględnieniu różnych technologii stosowanych w procesie wytwarzania.



Rys. 3.1 Integracja konstrukcyjno-technologiczna w systemach CAD/CAM [opracowanie własne]

### 3.2 Metody projektowania procesu technologicznego w systemach CAPP

Korzystając z systemów CAPP na potrzeby systemu CAM stosuje się dwie podstawowe metody projektowania procesu technologicznego: wariantową oraz generacyjną. Niektórzy eksperci wyodrębniają również trzecią, nazywaną semigeneracyjną (lub hybrydową) [Duda et al. 2015, Isnaini et al. 2014, Azab et al. 2007, Madan et al. 2022], będącą połączeniem metod wariantowej i generacyjnej.

Wariantowe projektowanie procesu technologicznego bazuje na podobnych częściach technologicznie oraz podobnych (typowych) procesach technologicznych. W systemie komputerowym następuje identyfikacja części podobnych oraz odpowiednia edycja procesu technologicznego tak, aby we właściwy sposób uwzględnić różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami części. Podstawą implementacji planowania wariantowego jest technologia grupowa.

Metody wariantowe, bazują na idei podobieństwa procesów technologicznych. Metoda polega na przyporządkowaniu, dla danej części procesu spośród opracowanych wcześniej procesów, zbiorów części technologicznie podobnych. Zautomatyzowane projektowanie procesu technologicznego, w ujęciu ogólnym, polega na przyporządkowaniu przez komputer, na podstawie kodu klasyfikacyjnego części, odpowiedniego dla tej części procesu



obejmującego plan operacji obróbki [Grabowik et al. 2014]. W zależności od wybranego procesu następuje jego dopasowanie, odpowiednio do części, do której został wybrany. Zakres zastosowania metody wariantowej ogranicza się do określonych grup części i zdefiniowanych typowych procesów. Należy zaznaczyć, że w wielu przypadkach zakres przeprowadzonych modyfikacji może być znaczny, co wynika także z faktu, że adaptowany proces technologiczny może być opracowany wcześniej w innych warunkach zewnętrznych, wpływających na przebieg projektowania. Przyjmuje się, że 30-90% elementów nowego wyrobu tworzą elementy wykonane wcześniej. Dla pozostałych części, zwłaszcza nietypowych, należy wypracować oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne i wykonać pełną dokumentację technologiczną, co według niektórych autorów [Koren et al. 2017, Kumar 2017] jest wadą tej metody i wpływa na ograniczenie jej stosowania.

Generacyjne projektowanie procesu technologicznego zakłada automatyczne syntetyzowanie (generowanie) planu procesu wytwarzania nowej części. Tworzenie nowego planu technologicznego odbywa się automatycznie na podstawie informacji o procesie wytwarzania zawartych w bazie danych, bez interwencji technologa. W zależności od przyjętego modelu projektowania system jest zdolny do generowania wymaganych operacji i ich sekwencji dla obrabianych części. Wiedza o wytwarzaniu musi być opisana i zakodowana w postaci cyfrowej, a zastosowanie logiki decyzyjnej pozwala imitować proces decyzyjny technologa.

Metoda generacyjna zakłada automatyczne (bez bezpośredniego udziału inżyniera) utworzenie wzorca procesu na podstawie stworzonego wcześniej zbioru zasad i reguł (tzw. law and rules). Metody generacyjne, bazujące na syntezie procesu technologicznego, przyniosły kolejny znaczący postęp w ewolucji systemów CAPP. Jak podkreśla się w literaturze, w metodzie generacyjnej nie występuje faza tworzenia wzorca procesu [Deja et al. 2018, Yan et al. 2023]. Dla zidentyfikowanych cech technologicznych części w stanie końcowym opracowywany jest zbiór działań transformujących cechę technologiczną. Następnie zbiór działań zostaje uporządkowany w oparciu o zbiór reguł i zasad obróbki. Uporządkowanie działań następuje w procesie syntezy elementarnych procesów technologicznych, opracowanych dla zbioru cech technologicznych tworzących część. Cechą charakterystyczną metod generacyjnych jest trudność w formalnym opisie reguł syntezy elementarnych procesów technologicznych w proces technologiczny obróbki. Trudności w tworzeniu rozległych baz wiedzy, określających reguły syntezy procesu, wymaganych w systemach generacyjnych z

jednej strony oraz wykazane powyżej wady metod wariantowych, doprowadziły do rozwoju metod hybrydowych określanych w literaturze mianem semigeneracyjnych.

Semigeneracyjne projektowanie procesu technologicznego polega na opracowaniu standardu głównego planu procesu, ale wzbogaconego o specjalne algorytmy, zdolne do wykonania niektórych zadań (a więc również podejmowania decyzji) w oparciu o specyficzne dla części cechy geometryczne. Metoda semigeneracyjna łączy więc zarówno procedury wyszukiwania, jak i algorytmiczne wspomaganie danymi z modeli CAD. W procesie projektowania procesu zazwyczaj stosuje się odpowiednie bazy danych, tablice lub drzewa decyzyjne, heurystyki lub reguły wiedzy. To sprawia, że metody te są bardziej elastyczne niż metody wariantowe, a w porównaniu do metod generacyjnych, które są obciążone trudnościami w formalnym opisie reguł decyzyjnych, znajdują szersze zastosowanie praktyczne.

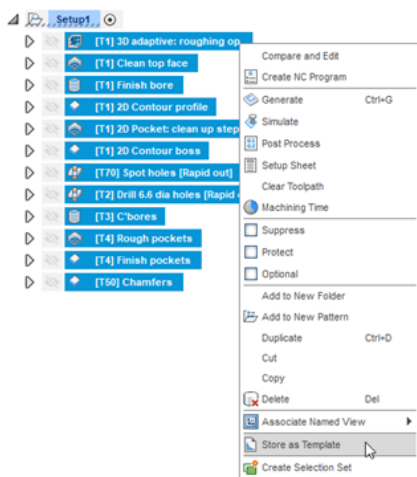
### **3.3 Automatyzacja programowania obrabiarek CNC w systemach CAM**

Analiza literatury z zakresu systemów CAD/CAM pozwala stwierdzić, że poziom wspomaganie komputerowego w zakresie automatyzacji programowania obrabiarek CNC jest stosunkowo niski. Wskazuje się, że o ile automatyzacja zadań realizowanych przy projektowaniu wyrobów w systemach CAD stała się już powszechna, to w zakresie programowania obróbki w systemach CAM jest nadal stosunkowo skromna [Brousseau et al. 2017, Xu et al. 2015, Perkasa 2019, Schaede et al. 2018]. Ogranicza to możliwości skracania czasu przygotowania produkcji. Ciągle jeszcze zadania związane z opracowaniem planu obróbki poszczególnych części realizowane są w trybie projektowania konwersacyjnego przez technologa/projektanta [Duda 2013]. Mimo możliwości jakie posiadają zintegrowane systemy CAD/CAM dzięki korzystaniu ze wspólnego modelu danych PPR (ang. Product, Process, Resources) brak jest wzorców proceduralnych, określających w jaki sposób automatyzować programowanie obrabiarek CNC. Sprawia to, że rozwiązania automatyzujące programowanie obróbki są niewdrażane lub są wdrażane w sposób doraźny, nie przynosząc oczekiwanych korzyści (tradycyjne, konwersacyjne programowanie okazuje się szybsze i skuteczniejsze). Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz obserwacji i własnych doświadczeń, autor dostrzega dwa sposoby rozwiązań umożliwiających chociaż częściowo automatyzować programowanie obrabiarek CNC – szablony obróbki oraz metody klasy Feature Recognition [Deja et al. 2013, Verma et al. 2010].

### 3.3.1 Szablony obróbkowe

Szablonami obróbki nazywa się wzorce przebiegu obróbki, zapisane w bazie danego systemu CAD/CAM [Lee et al. 2017, Kamrani et al. 2005]. Przypisuje się je do grupy części geometrycznie podobnych. Zawierają one informacje na temat kolejności oraz liczby operacji i zabiegów stosowanych podczas obróbki, parametrów obróbki, a także strategii poruszania się narzędzi w określonych zabiegach. Szablony tworzone są w celu skrócenia czasu przygotowawczego w procesie programowania obróbki [Kowalski 2020]. Technolodzy na bazie własnego doświadczenia tworzą szablony obróbki, którą są w stanie przypisywać później konkretnym częściom lub grupom części. Szablony tworzone w ten sposób eliminują konieczność każdorazowego opracowania struktury procesu technologicznego (jednocześnie struktury programu obróbkowego). Niestety, programy obróbki tworzone na podstawie szablonów obróbki wymagają w każdym wypadku ich edycji i dopasowania do określonej części (rys. 3.2). Operacje i zabiegi programów obróbki muszą zostać dopasowane do aktualnej geometrii części i podobnie jak w przypadku programowania konwersacyjnego czynność ta realizowana jest przez technologa.

#### KROK 1 – UTWORZENIE I ZAPIS SZABLONU DO BAZY



#### KROK 2 – ZASTOSOWANIE SZABLONU DLA NOWEJ CZĘŚCI

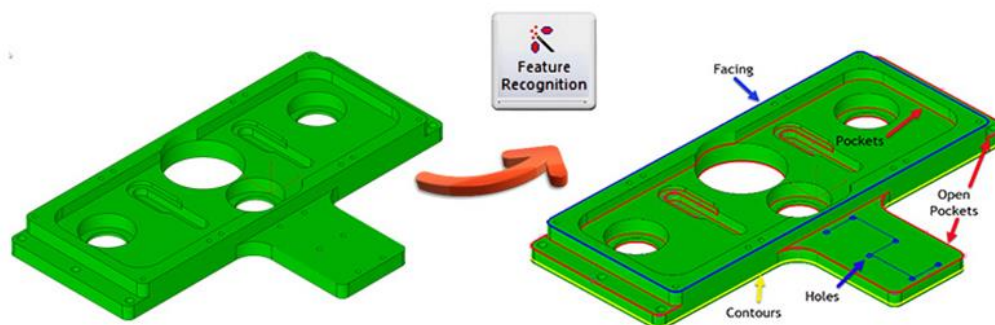


Rys. 3.2 Idea stosowania szablonów obróbki [Quadrasol]

### 3.3.2 Metody klasy Feature Recognition

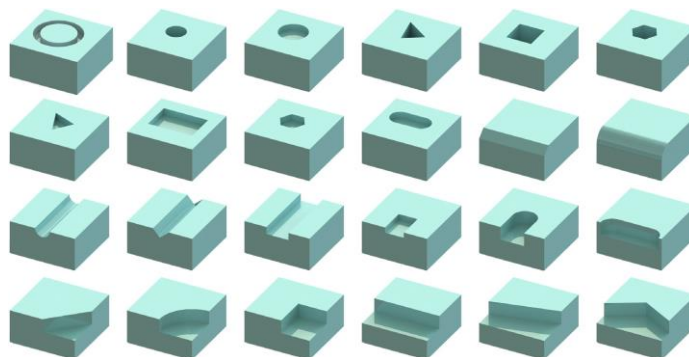
Najczęściej stosowanym w praktyce podejściem do automatyzacji programowania obróbki są metody opierające się na rozpoznawaniu cech geometrycznych danego modelu CAD

(FR - ang. Feature Recognition) i przypisywaniu do nich odpowiednich zabiegów obróbki (rys. 3.3) [Sateesh et al. 2017]. W praktyce metody te mogą przyspieszyć prace nad przygotowaniem programu, ale są skuteczne tylko dla modeli o stosunkowo prostych kształtach, nieposiadających powierzchni 3D.



Rys. 3.3 Efekt automatycznego rozpoznawania cech geometrycznych modelu CAD [EZCAM]

Pomimo, iż metody FR są znane już od trzech dekad, to nadal są przedmiotem licznych prac badawczych. Ich autorzy skupiają się na opracowaniu różnych narzędzi, potrafiących wykrywać cechy geometryczne modeli i skuteczniej wskazywać możliwe zabiegi technologiczne (rys 3.4) [Zhang et al. 2018, Tan et al. 2013, Sivakumar et al. 2013].

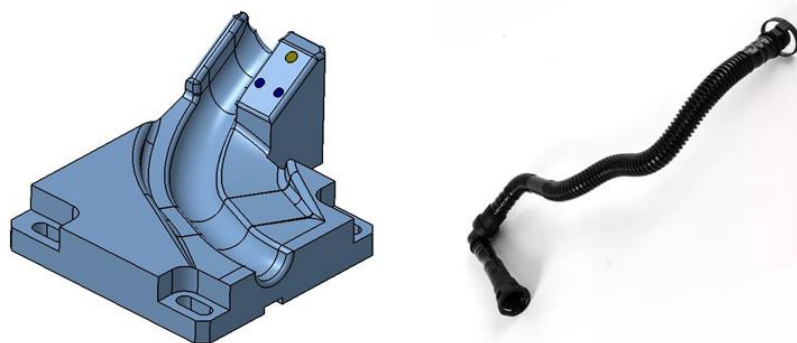


Rys. 3.4 Wybrane cechy geometryczne rozpoznawane w metodzie FR [Zhang et al. 2018]

W pracy [Zhou et al. 2019] zaprezentowano metodę FR (wspieraną metodami uczenia głębokiego) do doboru narzędzi skrawających, zwiększając skuteczność i wydajność tej części programowania obróbki. Należy podkreślić, że w wymienionych pracach nie porusza się kwestii automatyzacji programowania CAM w ujęciu systemowym (tj. ogólnym), mającym możliwość realnie wpłynąć na poprawę efektywności tego procesu, a jedynie na rozwijanie algorytmów poszukiwania konkretnych cech geometrycznych modeli 3D.

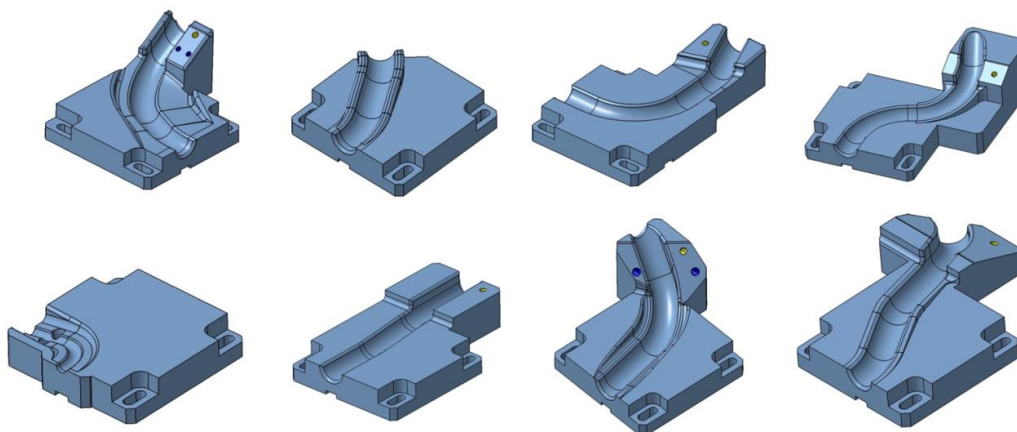
### 3.3.3 Zastosowanie metody Feature Recognition w praktyce – case study

W ramach wstępnych prac badawczych przeprowadzono test skuteczności metody FR. Zastosowano ją do przygotowania programów obróbki dla rodziny części specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego w postaci form do łączenia rur z konektorami, stanowiących elementy układu chłodzenia silnika spalinowego (rys. 3.5). Tego typu formy są przykładem rodziny części oprzyrządowania specjalnego, różniących się w niewielkim stopniu pod względem konstrukcyjnym (rys. 3.6), jednakże na tyle odmiennych, że procesy technologiczne poszczególnych części rodziny wykazują wyraźne różnice.



*Rys. 3.5 Forma do wciskania rur (po lewej) oraz rura samochodowego układu chłodzenia silnika (po prawej) [opracowanie własne]*

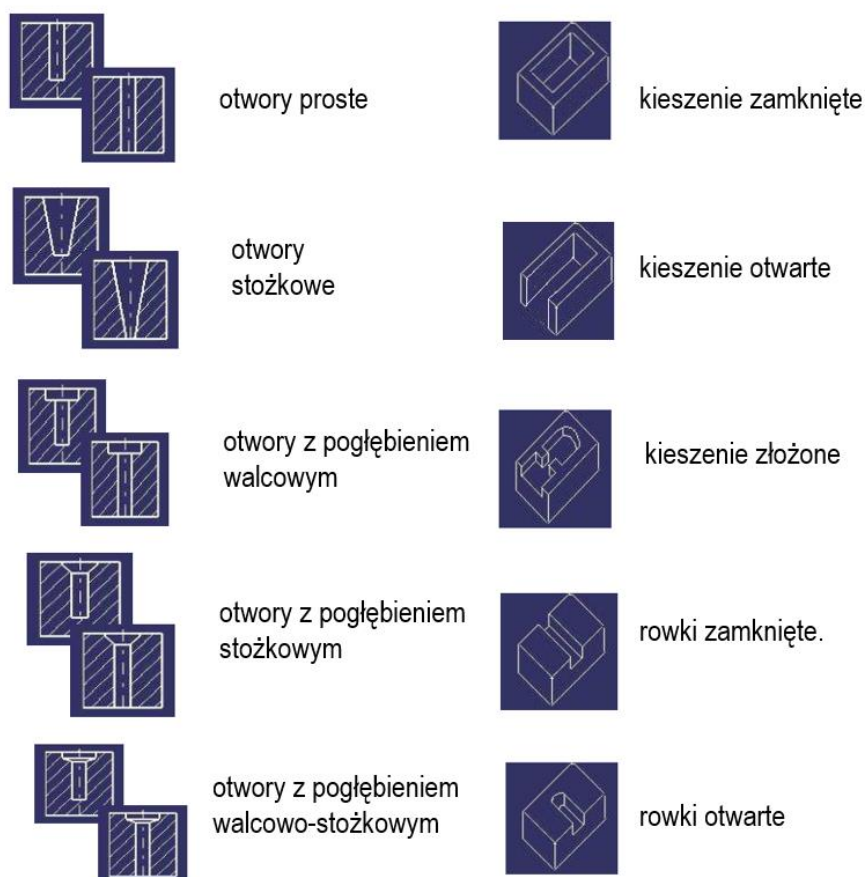
W zależności od wyposażenia konkretnego wariantu pojazdu, w którym jest stosowany dany silnik (znaczenie ma nie tylko typ silnika), układ chłodzenia może wykorzystywać od kilku do kilkunastu rur. W rezultacie w procesie produkcji tylko jednego modelu pojazdu konieczne jest przygotowanie rodziny OS do łączenia rur z konektorami, obejmujących kilkadziesiąt wariantów form. Do testu wybrano 8 wariantów form (rys. 3.6).



*Rys. 3.6 Przykłady różnych wariantów form do wciskania rur [opracowanie własne]*

Do testu metody FR wybrano oprogramowanie Catia V5 (metoda FR jest jedną z opcji przygotowania programu obróbki w systemie CAM). Funkcja automatycznej identyfikacji geometrii w tym systemie pozwala na wykrywanie następujących cech (rys. 3.7):

- otwory proste;
- otwory stożkowe;
- otwory z pogłębieniem walcowym;
- otwory z pogłębieniem stożkowym;
- otwory z pogłębieniem walcowo-stożkowym;
- kieszenie zamknięte;
- kieszenie otwarte;
- kieszenie złożone;
- rowki otwarte;
- rowki zamknięte.



Rys. 3.7 Przykłady cech geometrycznych wykrywanych w systemie CATIA [opracowanie własne na podstawie CATIADOC]

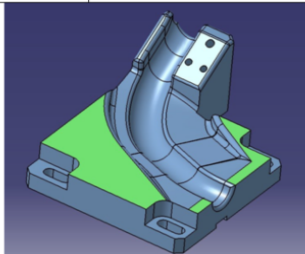
---

Zastosowanie w opisywanym teście programu Catia V5 okazało się właściwym wyborem, ponieważ program umożliwia rozpoznawanie cech geometrycznych nawet w modelach zapisanych w uniwersalnych formatach 3D (m.in. pliki w formacie STEP – [Xu et al. 2006]). W rozpatrywanym przykładzie nie dysponowano plikami natywnymi programu Catia, a biorąc pod uwagę takie ograniczenie, niektóre programy CAD wymagałyby opracowania od podstaw nowych modeli CAD form. Natomiast dużym ograniczeniem okazało się rozpoznawanie jedynie prostych cech geometrycznych, stosowanych głównie do definiowania obróbki 2,5D. W przypadku bardziej skomplikowanych kształtów czy powierzchni, tak jak w wybranym przypadku, zakres użyteczności metod FR był niewystarczający.

Podstawą do wykonania testu stanowiły przygotowane przez technologa karty technologiczne dla operacji obróbki (rys. 3.8) i poszczególnych zabiegów (rys. 3.9). Szczegółowe dane, zawarte w kartach stanowiły więc wytyczne do przeprowadzenia testu – programista CAM w oparciu o dokumentację technologiczną oraz przy zastosowaniu metody FR w programie Catia v5 miał przygotować program obróbki dla wybranej obrabiarki CNC. Warto dodać, że funkcja rozpoznawania cech w programie Catia V5 działa bardzo podobnie jak innych komercyjnych systemach CAD/CAM. Istotą testu była więc ocena skuteczności oraz korzyści w postaci skrócenia czasu programowania w systemie CAM, dzięki zastosowaniu metody rozpoznania cech geometrycznych FR. Programy obróbki przygotowywane były przez wykwalifikowanego programistę CAM (poziom doświadczenia osoby przygotowującej program ma istotny wpływ na poprawność oraz czas przygotowania programu).

		KARTA TECHNOLOGICZNA NR			Producent <b>MK-TECH</b>			
Rodzina części <b>Formy TRI</b>		Nazwa części <b>Forma do rur z BOHLER M230 30HRC</b>		Symbol Nr rys. Nr poz.		Nr zlecenia		
Gatunek i stan mat.		Opis rodziny <b>Formy do wciskania rur</b>		Sztuk/wyrób 1	kg/1 szt. netto	Sztuk na zlecenie, partię 1		
				Norma mater. kg/1 szt.		Materiał na zlecenie, partię		
Numer oper.	Rodzaj obróbki	Nazwa operacji/ Opis operacji		Oznaczenie operacji OP#1		Kat. rób.	tpz	T
	Stanowisko					Dodat.	tj	
10	Frezowanie	Zgrubna obróbka kieszeni otwartej						
	DMG DMU 50ECO							
20	Frezowanie	Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
30	Frezowanie	Obróbka kieszeni pod leb śruby I TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
40	Frezowanie	Obróbka kieszeni pod leb śruby II TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
50	Frezowanie	Obróbka kieszeni pod leb śruby III TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
60	Frezowanie	Obróbka kieszeni pod leb śruby IV TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
70	Frezowanie	Obróbka otworów 6.5mm I TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
80	Frezowanie	Obróbka otworów 6.5mm II TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
90	Frezowanie	Obróbka otworów 6.5mm III TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
100	Frezowanie	Obróbka otworów 6.5mm IV TRI #1						
	DMG DMU 50ECO							
Data oprac.		Data norm.	Data sprawdz.	Data zatw.		Wydanie	Arkusz	

Rys. 3.8 Fragment karty technologicznej dla operacji obróbki formy do wciskania rur  
[opracowanie własne]

INSTRUKCJA OBRÓBK						Nr operacji: #1	Nr części:												
						Stanowisko: Obrabiarka DMG DMU 50ECO	Nr rys./poz.												
Nazwa operacji: Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1		Nazwa części: Formy do rur z BOHLER M230 30HRC				Material:	Sztuk:	Arkusz:											
								Ilość arkuszy:											
Nr zabiegu	Opis zabiegu	Prędkość skrawania [m/min]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość posuwu [mm/obr]/ [mm/ząb]	Pomoce warsztatowe													
10	Frezowanie – obróbka kieszeni	120	3	3	0.06	Zabieg	Nazwa	Symbol nr rys.	Ilość										
						Obróbka kieszeni	F-10-DO-R2												
																			
Opracował:						Sprawdził:		Zatwierdził:											
<table border="1"> <tr> <td>Nr</td> <td>Zamiast</td> <td>Powinno być</td> <td>Data</td> <td>Podpis</td> </tr> <tr> <td>Wymiar</td> <td>Odchyłka</td> <td>Zmiany</td> <td>data</td> <td>podpis</td> </tr> </table>						Nr	Zamiast	Powinno być	Data	Podpis	Wymiar	Odchyłka	Zmiany	data	podpis	data		podpis	
Nr	Zamiast	Powinno być	Data	Podpis															
Wymiar	Odchyłka	Zmiany	data	podpis															
data						data		data											
podpis						podpis		podpis											

Rys. 3.9 Instrukcja obróbki – zabieg frezowanie kieszeni [opracowanie własne]



Zastosowanie narzędzi FR dla wybranego modelu formy pozwoliło na wykrycie jedynie trzech cech geometrycznych: rowka oraz kieszeni otwartych i zamkniętych (rys. 3.10), które umożliwiły automatyczne utworzenie 11 zabiegów z karty technologicznej (całkowita liczba zabiegów w karcie wynosiła 21). Pozostałe cechy geometryczne modelu nie zostały znalezione i wymagały programowania obróbki metodą tradycyjną (dotyczyło to przede wszystkim obróbki powierzchni, której przygotowanie jest najbardziej pracochłonne). Metoda FR pozwoliła skrócić czas przygotowania programu o 8 min w stosunku do konwersacyjnej metody programowania (23 min), co stanowiło w tym przypadku ok. 30% czasu.



Rys. 3.10 Cechy geometryczne modelu formy rozpoznane automatycznie przez funkcję FR systemu CATIA [opracowanie własne]

Pomimo, iż metody FR pozwalają na rozpoznawanie jedynie prostych cech geometrycznych, to ich zastosowanie w praktyce jest uzasadnione i wręcz pożądane w przypadku prostych części, obrabianych w cyklach 2,5D. Oprócz skrócenia czasu programowania mogą przyczynić się też do wzrostu standaryzacji obróbki wybranych kształtów. Niemniej, ich zastosowanie nie spełnia oczekiwań w zakresie przygotowywania programów obróbki dla całych, bardziej skomplikowanych rodzin części. Ich skuteczność jest niewystarczająca, co sprawia, że konieczne jest poszukiwanie innych, bardziej zaawansowanych rozwiązań.

Ponadto, przeprowadzony test wykazał, że metody typu FR nie wspomagają zarządzania danymi. Te same parametry procesu technologicznego zdefiniowane dla jednego wariantu formy trzeba było dla kolejnego wariantu definiować od nowa (kolejność i parametry zabiegów technologicznych, informacje podstawowe na temat części i półfabrykatu). Tworzenie programów obróbki przez programistę CAM dostarczało wiedzy, którą stosował do kolejnych wariantów. Najczęściej wiedza ta nie jest gromadzona oraz sformalizowana, istnieje zatem ryzyko, że gdyby programowanie CAM dla kolejnych wariantów odbywało się w znacznych odstępach czasowych (np. liczonych w tygodniach) to część wypracowanej przez

programistę/technologa wiedzy, mogłaby zostać utracona. Dlatego też bez względu na typ metody programowania CAM (konwersacyjny, czy z narzędziami do automatyzacji) w przypadku tworzenia programów obróbki dla rodziny części uzasadnione jest wykorzystywanie narzędzi z zakresu zarządzania wiedzą.

---

## Rozdział 4.

# Projektowanie oparte na wiedzy

### 4.1 Inżynieria wiedzy w obszarze inżynierii projektowania

Istotą procesu projektowania inżynierskiego jest rozwiązywanie konkretnych problemów technicznych, dlatego też obszar prac naukowych w dziedzinie inżynierii projektowania od wielu lat łączony jest z dziedziną inżynierii wiedzy.

Termin „inżynieria wiedzy” (KE - ang. Knowledge Engineering) został wprowadzony na potrzeby informatyki i związany był z budową baz wiedzy dla rozwiązań szeroko rozumianej sztucznej inteligencji [Kendal et al. 2007]. Obecnie inżynieria wiedzy uznawana jest za dziedzinę interdyscyplinarną, obejmując nie tylko informatykę i matematykę, ale również kognitywistykę, czy psychologię [Silva de Oliveira et al. 2022]. Do głównych nurtów rozwoju zalicza się dziś automatyczne uczenie się i wydobywanie wiedzy z dużych zbiorów danych, właśnie na potrzeby sztucznej inteligencji, której ingerencja w codzienne życie człowieka jest coraz bardziej widoczna [Cioffi et al. 2018, Miller 2019]. Różne metody i narzędzia inżynierii wiedzy stanowią podstawę budowy informatycznych systemów opartych na wiedzy (KBS - ang. Knowledge Based System), nazywanych również systemami ekspertowymi (ang. Expert Systems), wspomagając człowieka w analizach, ocenach i podejmowaniu decyzji [Tan et al. 2016], np. w ekonomii [Bahrammirzaee et al. 2010], medycynie [Saibene et al. 2021], rolnictwie [Tan et al. 2022, Yelapure et al. 2012] oraz wielu innych. W obszarze inżynierii, a szczególnie w obszarze projektowania, zaowocowało to wprowadzeniem terminu „projektowania opartego na wiedzy” (KBE) [Dym et al. 1991, Gonzalez et al. 1993], oznaczającego budowę systemów ekspertowych, dedykowanych rozwiązywaniu problemów technicznych.

Problematyka opracowania systemów KBE stała się przedmiotem wielu badań jeszcze w latach 90-tych [Chapman et al. 1999, Whitney et al. 1999, Calkins et al. 1999]. Prowadzono liczne prace mające na celu opracowanie wzorców metodycznych, opisujących w jaki sposób wspomagać budowę takich systemów [Ammar-Khodja et al. 2008]. U podstaw leżało zazwyczaj opracowanie bazy wiedzy w oparciu o repozytoria, bazy danych czy nawet sztuczną inteligencję [Pokojski 2005]. Jak zauważa Skarka [Skarka 2010] - przetwarzanie danych w bazie wiedzy jest zazwyczaj najważniejszym zagadnieniem w procesie budowy systemu

klasy KBE i wymaga opracowania odpowiedniej struktury jej składowych. Przeniesienie wiedzy eksperta do systemu komputerowego okazuje się jednym z trudniejszych zadań i często stanowi wąskie gardło w rozwoju systemów KBE [Reddy et al. 2015]. Korzyści mogą być jednak znaczące, ponieważ rozpoznana i zgromadzona wiedza specjalistów o tym co, jak i kiedy należy robić pozwala na jej łatwiejsze stosowanie w nowych projektach, szczególnie przez mniej doświadczonych inżynierów. Integracja baz wiedzy z programem CAD oraz technikami programowania pozwala na automatyzację prac, realizowanych przez projektantów [Chapman et al. 1999]. W ten sposób system KBE może np. automatycznie dobrać materiał, przypisać cechy geometryczne poszczególnym częściom, a nawet automatycznie wykonać operacje związane z modelowaniem 3D. Formalizacja wiedzy wpływa też na wzrost standaryzacji procesu [Verhagen et al. 2012, et al. Choi 2007, Van der Laan 2008, Stokes 2001]. Projekty nowych części budowane są wówczas według wypracowanych na przestrzeni lat wytycznych, przy zachowaniu powtarzalności rozwiązań konstrukcyjnych, zapewnieniu wymaganych norm i wypracowanych w biurze technicznym dobrych praktykach. Efektywne stosowanie systemu KBE w praktyce może się też w znacznym stopniu przyczynić do osiągnięcia przez przedsiębiorstwo założeń strategii masowej kastomizacji, gdyż skraca się czas opracowania projektu nowego wyrobu, a tym samym maleją jego koszty [Górski et al. 2016, Zawadzki et al. 2016, Hamrol et al. 2019].

#### **4.2 Zarządzanie wiedzą w biurze technicznym**

Chociaż „wiedza” jest powszechnie używanym i rozumianym terminem to w literaturze przedstawiana jest w różny sposób. Najczęściej definiuje się ją jako: „sposób rozwiązywania pewnych problemów, podejmowania decyzji czy uczenia się, poprzez wnioskowanie z informacji” [Beckman 1997]. Wiedzę można również interpretować jako „zestaw prawd i przekonań, perspektyw i pojęć, ocen i oczekiwań, metodologii i umiejętności praktycznych” [Wiig 1995], które powinny być przedstawione w sposób zrozumiały dla odbiorcy [Turban 2001]. W kontekście technicznym, szczególnie trafna wydaje się definicja Davenport’a i Prusak’a, określająca wiedzę jako: „informację połączoną z doświadczeniem, kontekstem, interpretacją i refleksją gotową do zastosowania w działaniu i podejmowaniu decyzji” [Davenport et al. 1997]. Właśnie ze względu na kontekst podejmowania właściwych decyzji, wiedzę należy postrzegać jako szczególny zasób przedsiębiorstwa, którego przewaga konkurencyjna bardzo często jest skorelowana właśnie z wiedzą i doświadczeniem swoich pracowników.

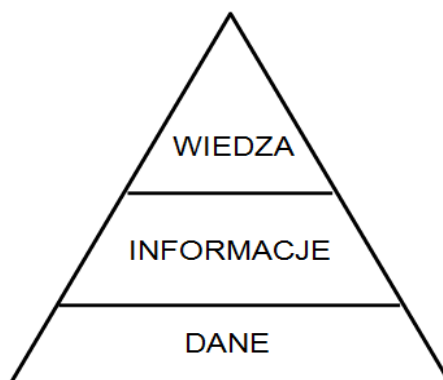
Zarządzanie wiedzą jako proces, jest więc działaniem niezwykle dla przedsiębiorstwa istotnym [Jemieliński et al. 2021]. Służy identyfikacji, zachowaniu i upowszechnianiu wiedzy wewnątrz organizacji, podnosząc sprawność i efektywność działania całej kadry, w każdym obszarze funkcjonowania firmy [Hislop et al. 2018]. Choć zarządzanie wiedzą wymaga działania na bardzo szerokim polu, obejmując m.in. styl kierowania, kulturę i strukturę organizacji, a nawet strategię firmy, to od strony praktycznej kluczowe są zagadnienia związane z tym jak skutecznie wiedzę gromadzić i zapisywać, aby możliwe było korzystanie z jej zasobów w przyszłości [Xue et al. 2017]. Niestety problematyka zarządzania wiedzą w biurach technicznych jest nadal zagadnieniem marginalizowanym, szczególnie w małych i średnich przedsiębiorstwach. Inżynierowie rozwiązują pojawiające się problemy w sposób doraźny i nie koncentrują się na archiwizacji procesu decyzyjnego. Tym samym utrudniają skuteczne stosowanie zdobytej wiedzy w przyszłości, a nawet zwiększają prawdopodobieństwo powtórnego analizowania problemów już kiedyś rozwiązanych. Co więcej, brak procedur zarządzania wiedzą i negatywne skutki takiego zaniechania uwypuklają się w momencie zwolnienia lub odejścia pracownika, gdyż niesformalizowana wiedza eksperta jest zasobem przedsiębiorstwa, dopóty ten jest jego częścią. Jednak nawet, jeżeli świadomość wagi wiedzy w rozwiązywaniu problemów jest w biurze technicznym obecna, to pojawiają się z kolei trudności z jej skutecznym pozyskiwaniem, zapisem i stosowaniem. Z tego też powodu niezwykle istotny jest odpowiedni dobór metod pozyskiwania i reprezentacji wiedzy.

#### 4.3 Reprezentacja wiedzy inżynierskiej

Wiedza związana jest ściśle z dziedziną jej stosowania, dlatego też w celu jej lepszego zrozumienia wprowadzono różne klasyfikacje, gdzie podstawowy podział obejmuje [Babik 2005]:

- wiedzę deklaracyjną – stwierdzenia i reguły opisujące fałszywość lub prawdziwość wyrażen, szczegółowo opisujących daną dziedzinę zastosowania;
- wiedzę proceduralną – opis dziedziny zastosowania wiedzy poprzez zbiór procedur;
- wiedzę ukrytą – wiedza trudna do uzasadnienia, postrzegana jako wewnętrzny kontekst informacji;
- wiedzę jawną – łatwa do usystematyzowania, możliwa do przedstawienia w formie słów, liczb lub symboli.

Z kolei, biorąc pod uwagę formalizację wiedzy w systemach informatycznych stosuje się hierarchiczny podział na: dane, informacje i wiedzę (rys. 4.1). Danymi mogą być fakty, liczby



*Rys. 4.1 Hierarchia wiedzy w systemie informatycznym [Applehans et al. 1999]*

bądź inne formy wyrazu, opisujące zdarzenia i obiekty. Przetworzenie danych w sposób zrozumiały dla odbiorcy zamienia je w informacje, które charakteryzują się kontekstem i dostarczają nowego punktu widzenia. Świadome zrozumienie i wykorzystanie informacji stają się wiedzą. Przygotowując bazę wiedzy dla systemu informatycznego należy określić źródła danych oraz sposób ich akwizycji.

W biurach technicznych występuje mnogość źródeł, które stanowią podstawę pozyskiwania wiedzy. Do najważniejszych należy oczywiście dokumentacja techniczna (w tym rysunki wykonawcze, złożeniowe, modele CAD 3D, karty technologiczne, programy NC) zarówno projektów trwających, jak i zakończonych. Ponadto ważne są również dokumenty normatywne i prawne, określające standardy stosowanych w danej dziedzinie rozwiązań oraz przepisy i regulacje (np. homologacyjne). Akwizycję wiedzy prowadzi się również w oparciu o wyniki badań symulacyjnych, eksploatacyjnych, raporty z działu jakości lub audytów, a także katalogi branżowe czy literaturę. Ważne są też dane opisujące reklamacje lub inne uwagi klientów. Natomiast bardzo często bogatym źródłem danych, mających kluczowe znaczenie dla skutecznego stosowania wiedzy w organizacji są osobiste notatki inżynierów (ekspertów dziedziny).

Określenie źródeł danych ma wpływ na wybór sposobu ich pozyskania. Inżynieria wiedzy definiuje różne metody akwizycji wiedzy, dostosowane do charakteru analizowanego procesu, takie jak bezpośredni zapis, obserwację, śledzenie, wywiady, uczenie na bazie przykładów, instrukcji oraz analogii [Trajer et al. 2012]. Gromadzenie wiedzy stosowanej i kreowanej w biurze technicznym jest stosunkowo proste, gdy dotyczy wiedzy jawnej, natomiast znacznie trudniejsze, gdy związane jest z wiedzą ukrytą. Proces pozyskiwania wiedzy jest dodatkowo utrudniony, ponieważ nawet sami eksperci często mają problem z jej opisaniem. Dlatego

w procesie akwizycji wiedzy należy opracować najpierw odpowiednią procedurę, biorąc pod uwagę takie zadania jak: identyfikację źródeł wiedzy, określenie sposobu jej reprezentacji, modelowanie wiedzy (języki i ontologie), pozyskanie wiedzy i jej zapis, a także weryfikację, walidację oraz uszczegóławianie (rozbudowa) bazy wiedzy.

Baza wiedzy jest podstawowym elementem składowym komputerowego systemu eksperckiego. Stanowi zbiór opisanych przez specjalistów, powiązanych logicznie reguł, definicji pojęć oraz opisu faktów, dotyczących określonej dziedziny wiedzy [Juszczuk 2020]. Odpowiednia jej reprezentacja ma nie tylko pozwolić efektywnie wiedzę stosować, ale również zapewniać rozwój samej bazy. Projektowanie baz wiedzy jest zadaniem interdyscyplinarnym, zazwyczaj wymagającym połączenia kompetencji programistów, inżynierów wiedzy, specjalistów dziedzinowych a nawet docelowych użytkowników. W systemach klasy KBE wiedzę ekspercką opisuje się w sposób formalny najczęściej w postaci relacyjnej bazy danych, wzbogaconej odpowiednią warstwą obsługi, ułatwiającą korzystanie z zapisanych zasobów jak i wprowadzanie zmian oraz rozbudowę zgromadzonych danych.

#### **4.4 Metodyki budowy systemów klasy KBE**

Chociaż opracowanie rozwiązań klasy KBE w przemyśle należy uznać za powszechne (rozwiązania tego typu powstawały jeszcze w latach 90-tych XX w. w wielu różnych branżach) to w opinii autora nie są zbyt popularne. Na pewno wpływ na to ma złożoność działań, jakie trzeba zrealizować, aby taki system z powodzeniem uruchomić oraz fakt, że trudno jest w praktyce zastosować do tego celu konkretne wzorce metodyczne. Jak zauważył Verhagen, aż 80% rozwiązań tego typu przygotowywana jest w sposób doraźny, bez zastosowania konkretnego podejścia [Verhagen et al. 2012], co potwierdzają również najnowsze badania [Kugler 2023]. Dzieje się tak, mimo iż od lat tworzy się standardy, mające na celu uporządkowanie procesów przetwarzania wiedzy. Na początku prowadzono prace nad uogólnionymi opisami metod i wytycznych, wspierających budowę systemów klasy KBS [Schreiber 2008]. Były one jednak niewystarczające dla bardziej wymagających procesów inżynierskich, dlatego wielu specjalistów prowadziło prace skoncentrowane właśnie na wspieraniu procesu budowy systemów klasy KBE. Doprowadziło to do opracowania standardów, do których zaliczyć należy m.in.:

- MOKA (ang. Methodology and software tools Oriented to Knowledge based engineering Applications),
- KNOMAD (ang. Knowledge Capture & Identification of Knowledge Change, Normalisation, Organisation, Modelling & Implementation, Analysis and Delivery),

- KADM (ang. Knowledge Aided Design Methodology),
- MDAVP (ang. Methodology of Design Automation of Variant Products).

Metodyka MOKA została opracowana by wspierać budowę inżynierskich systemów KBE [Stokes 2001] zorientowanych na proces projektowo - konstrukcyjny. Autorzy wyróżnili sześć etapów budowy aplikacji, choć właściwe zastosowanie tej metodyki obejmuje jedynie dwa z nich: etap akwizycji i formalizacji wiedzy. Strukturalizację wiedzy realizuje się na podstawie dwóch przygotowanych modeli: nieformalnego oraz formalnego. Pierwszy opiera się o zastosowanie specjalnych formularzy ICARE (ang. Illustration, Constraints, Activities, Rules, Entities) i służy do pozyskania wiedzy i jej dekompozycji na podstawowe elementy. Drugi model przeznaczony jest do budowy bazy wiedzy i zakłada zastosowanie języka MML (ang. Moka Modelling Language) do przygotowania formalnego opisu wyrobu i procesu na potrzeby budowanej aplikacji. Do największych zalet zalicza się koncepcję formularzy ICARE, które pozwalają na uporządkowanie wiedzy technicznej w sposób zrozumiały dla użytkownika. Jako wadę wskazuje się zbyt duże zorientowanie na wyrób, mniejsze na proces [Verhagen et al. 2012] oraz wspieranie jedynie prac realizowanych przez inżynierów wiedzy, pomijając chociażby przyszłych użytkowników systemu [Reddy et al. 2015].

KNOMAD [Curran et al. 2010] przedstawia inne podejście, będące odpowiedzią na rozpoznane braki w obszarze budowy systemów KBE (głównie wobec MOKA). Metodyka koncentruje się przede wszystkim na uwzględnieniu zadań charakterze wielodyscyplinarnym, mającym wpływ na decyzje podejmowane w projektowaniu wyrobu, takich jak analiza kosztów.

Inne spojrzenie proponuje metodyka KADM, która zakłada, że ostateczną formą reprezentacji wiedzy o projektowaniu jest tzw. model autogenerujący, opracowywany w konkretnym systemie CAx [Skarka 2007]. Metodyka obejmuje proces przetwarzania wiedzy w trzech podstawowych fazach:

- akwizycja – pozyskiwanie wiedzy od ekspertów m.in. z wykorzystaniem formularzy ICARE (MOKA);
- formalizacja – budowa modelu autogenerującego w systemie CAx;
- implementacja – praktyczne stosowanie i rozwój modelu autogenerującego.

Istota metodyki KADM zakłada zastosowanie różnych modeli wiedzy, opisanych w języku UML (ang. Unified Modeling Language), stanowiących rozwinięcie podejścia znanego z MOKA. Wyróżnia się aż cztery rodzaje modeli wiedzy, które zostały podzielone ze względu



---

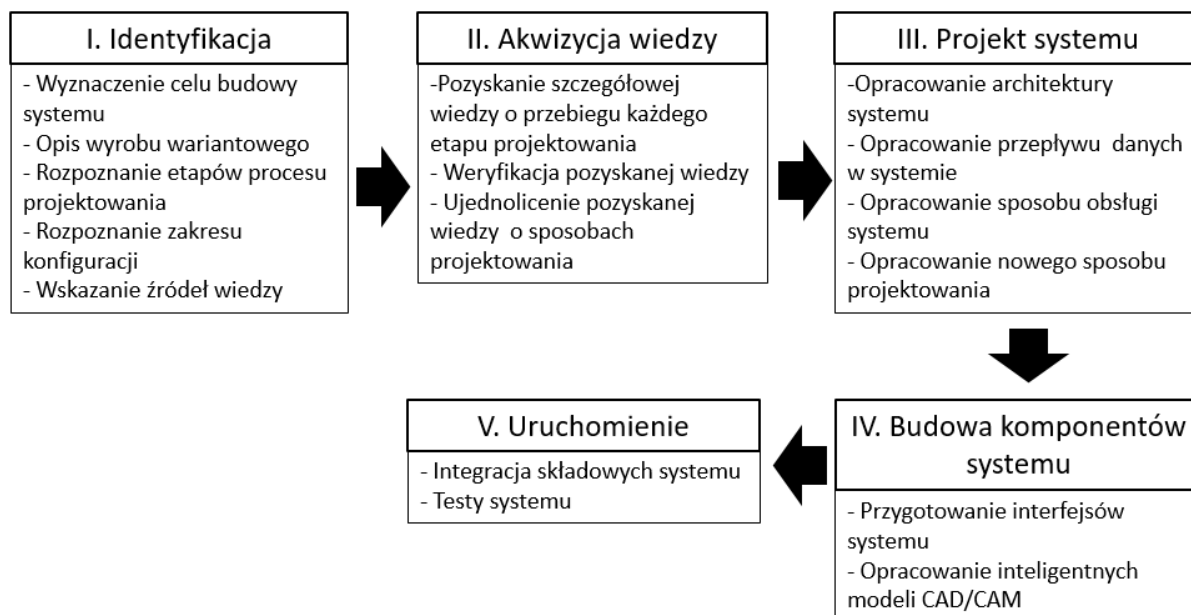
na kryterium merytoryczne (produkt i proces konstrukcyjny), kryterium poziomu konkretyzacji (metamodel i model) oraz kryterium stosowanej reprezentacji wiedzy (nieformalny i formalny).

KADM koncentruje się jedynie na procesie konstrukcyjnym, a budowany system KBE staje się tak naprawdę integralną częścią systemu CAx. Te rozwiązania są dedykowane zatem tylko doświadczonym projektantom, dobrze znającym środowisko CAx z którego korzystają. Nie rozważa się też innych zadań realizowanych w procesie projektowania.

Z kolei ideą metodyki MDAVP jest procedura, pozwalająca na budowę systemu KBE, przeznaczonego do automatyzacji procesu projektowania wariantów wyrobu konfigurowalnego [Zawadzki 2018]. Obszar zastosowania metodyki obejmuje zadania o charakterze technicznym (dokumentacja projektowa) oraz organizacyjnym (obsługa systemu automatyzacji), pozwalając na integrację zadań konfiguracji wariantu przez Internet (klient) oraz jego projektowanie w systemie CAD (producent). W tym obszarze metodyka dostarcza uniwersalnego podejścia, umożliwiającego pozyskiwanie i weryfikację wiedzy o zadaniach realizowanych podczas projektowania oraz dalsze jej przetwarzanie i implementację w systemie KBE.

W procesie budowy systemu KBE według metodyki MDAVP wyróżnia się następujące etapy (rys. 4.2):

- I. Projekt systemu automatyzacji
- II. Akwizycja wiedzy
- III. Weryfikacja wiedzy
- IV. Formułowanie zadań systemu
- V. Formalizacja wiedzy
- VI. Wdrożenie systemu



Rys. 4.2 Etapy metody MDAVP [Zawadzki 2018]

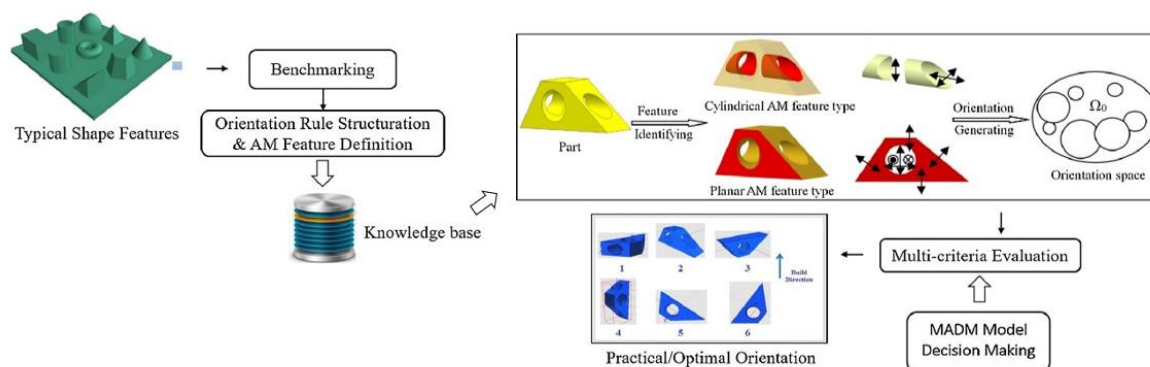
Projekt systemu automatyzacji dotyczy przygotowania opisu rozwiązania automatyzacji projektowania wariantów konkretnego wyrobu. Na etapie akwizycji wiedzy za pomocą formularzy zbierane są dane o wyrobie i procesie jego projektowania. Kolejny etap - weryfikacja wiedzy to analiza zapisanych danych i informacji. Etap formułowania zadań systemu dotyczy opisu zmodyfikowanych lub nowych zadań realizowanych w budowanym systemie (np. zarządzanie danymi o użytkownikach lub nowa procedura modelowania CAD). Formalizacja wiedzy polega na przygotowaniu opisu nowych procedur w postaci algorytmów lub diagramów oraz wykonanie praktycznych prac programistycznych (interfejs obsługi) i inżynierskich (modele CAD). Na etapie wdrożenia wykonuje się integrację składowych systemu i przeprowadza się testy.

#### 4.5 Przykłady wdrożeń systemów KBE

Analiza literatury z zakresu opracowania systemów klasy KBE pokazuje, iż znaczna większość prac ma charakter studium przypadku i dotyczy przede wszystkim procesów projektowania wyrobu a nie technologii. Autorzy koncentrują się w nich głównie na wykorzystaniu programów klasy CAD, a prac dotyczących projektowania procesów technologicznych (w tym wspomaganie programowania obrabiarek CNC) z zastosowaniem programów CAM jest znacznie mniej.

Ciekawe zastosowanie systemu KBE jako sposobu wspomagającego proces projektowania technologii przedstawiono w pracy p.t. „A KBE CAPP framework for qualified additive

manufacturing” [Zhang et al. 2018]. Autorzy przedstawiają w niej podstawy budowy i działania autorskiego systemu CAPP opartego na wiedzy, na przykładzie procesu wytwarzania przyrostowego (AM - ang. Additive Manufacturing). Główną propozycją jest użycie metody opartej na wiedzy, w celu zwiększenia niezawodności procesu projektowania wytwarzania oraz ujednolicenia sposobów transformacji z modelu CAD do maszyny (w tym przypadku drukarki 3D), dzięki wykorzystaniu dedykowanej bazy danych. Opracowane rozwiązanie przyjmuje cechy systemu ekspertowego, ponieważ wspomaga podejmowanie decyzji procesowych. System pozwala określać orientację ułożenia modelu w przestrzeni roboczej maszyny (rys. 4.3), wspomaga jego podział na warstwy i podpowiada strategię ścieżek głowicy maszyny AM.



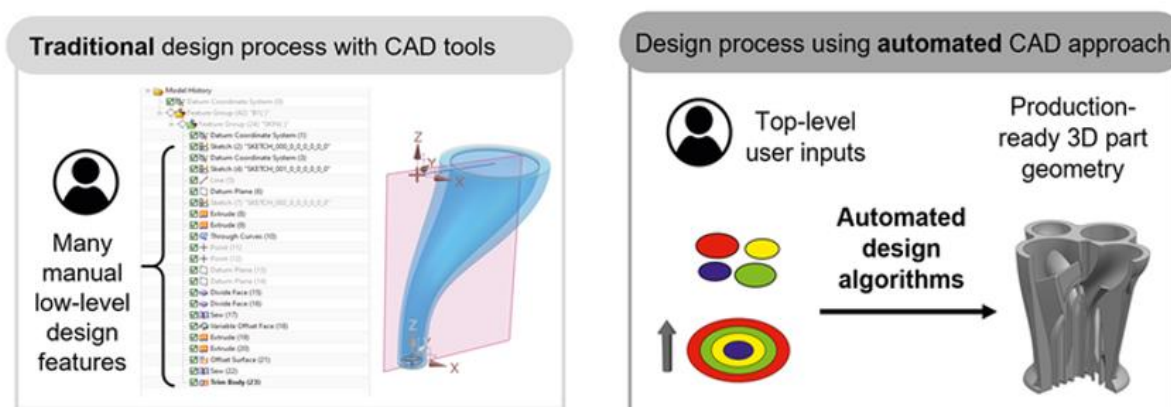
Rys. 4.3 Schemat wspomaganego wyboru najlepszej orientacji ułożenia modelu w przestrzeni maszyny [Zhang et al. 2018]

Z kolei w pracy pt. „Digital Threads via Knowledge-Based Engineering Systems” [David et al. 2021], autorzy przedstawili badania wykorzystania systemu KBE i CAD realizacji cyfrowego obiegu danych w „przedsiębiorstwie opartym na modelach” (ang. Model-based enterprise - MBE). W artykule zaproponowano cztery kierunki i zidentyfikowano potencjalne technologie wspomagające, którymi dysponują systemy KBE. Ponadto przedstawiono studium przypadku demonstrujące wykorzystanie systemu KBE do projektowania gwintu dla procesu montażu produkcyjnego.

Biedermann wraz z współautorami [Biederman et al. 2021] w swojej pracy przedstawili automatyczne podejście do generowania części na potrzeby procesu wytwarzania addytywnego. Ich podejście jest z pewnością ciekawą alternatywą dla metody tradycyjnej i może być atrakcyjne dla specjalistów/praktyków, zajmujących się technikami AM. W pracy opisano podstawowe czynności wymagane do opracowania zautomatyzowanego, opartego na

wiedzy narzędzia do projektowania, na przykładzie kolektorów przepływowych, wykorzystując założenia metodyki MOKA oraz programu CAD (rys. 4.4).

Inny przykład automatyzacji projektowania, oparty o KBE i CAD (Autodesk Inventor) zaprezentował w swojej pracy Gembarski [Gembarski 2022]. Praca przedstawia system automatyzacji projektowania oprzyrządowania (uchwytów ustalających), pozwalający na automatyzację powtarzających się w procesie projektowym rutynowych czynności.



Rys. 4.4 Schemat porównujący tradycyjne, ręczne modelowanie CAD z podejściem zautomatyzowanym [Biederman et al.2022]

Opis budowy systemu klasy KBE, opracowanego dla przemysłu drzewnego, można znaleźć w pracy pt. „Knowledge-Based Design in Industrialised House Building: A Case-Study for Prefabricated Timber Walls”. Autorzy [Day et al. 2019] ilustrują sposób podejścia do projektowania opartego na wiedzy w sektorze budownictwa mieszkaniowego w Australii. Kontekstem badań jest technologia obróbki drewna i prefabrykowanych komponentów, a w zakresie metodycznym – metody pozyskiwania wiedzy jawnej i ukrytej oraz ich formalizacji do postaci cyfrowego modelu CAD (Catia – 3DExperience). Wyniki pokazują jak takie podejście może znacząco zmienić powszechne praktyki projektowe, poprzez minimalizowanie poprawek i zmniejszanie fragmentacji danych.

W artykule pt. „Knowledge based engineering as a condition of effective mass production of configurable products by design automation” [Górski et al. 2016] przedstawiono możliwości usprawnienia procesów projektowania i przygotowania do produkcji wyrobów konfigurowalnych (wariantowych) w zakresie realizacji strategii masowej kastomizacji. Studium przypadku opisuje proces projektowania łączników sanitarnych wraz ze specjalnym oprzyrządowaniem produkcyjnym. Autorzy opracowali system klasy KBE, wykorzystując w do tego celu autorską metodykę MDAVP. Przedstawione wyniki dowodzą, że redukcja czasu

potrzebnego na zaprojektowanie i przygotowanie do produkcji może być znacząca, co uzasadnia wykorzystanie systemów KBE jako sposobu na optymalizację wytwarzania wyrobów konfigurowalnych.

Inny przykład prezentują w swojej pracy Tiwarii, Jain i Tandon [Tiwarii et al. 2013]. Opisali oni zbudowany na potrzeby automatyzacji projektowania połączenia sworzniowego system klasy KBE. Składa się on z dwóch składowych: bazy danych, opracowanej w środowisku MS Access, oraz z programu CAD NX, wraz z modułem wiedzy Knowledge Fusion. Autorzy opracowali własną koncepcję systemu KBE i przedstawili sposób działania swojego rozwiązania. Obecny stan techniki pozwala stwierdzić, że rozwiązania typu KBE nadal mają znaczny potencjał wdrożeniowy (dotąd nie w pełni wykorzystywane). Ponadto, programowanie obrabiarek CNC w programach CAM wydaje się w tym obszarze luką, którą warto zagospodarować. Opisany w niniejszej pracy proces wytwarzania rodzin specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego jest, w opinii autora, odpowiednim przykładem do tego, aby zweryfikować zalety rozwiązań KBE w kontekście projektowania procesów technologicznych. 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. Aplikacja bazodanowa powinna zatem umożliwiać m.in. na:

- opis operacji technologicznych,
- opis zabiegów technologicznych,
- wprowadzanie danych o obrabiarkach CNC,
- wprowadzanie danych o narzędziach do obróbki,
- wprowadzanie danych o częściach,
- wprowadzanie danych o półfabrykatakach.

Ponadto wzbogacenie bazy o możliwość zapisu danych opisujących powykonawcze wyniki wytwarzania rodziny oprzyrządowania, takie jak rzeczywisty czas programowania CAM, rzeczywisty czas obróbki czy poniesione koszty pozwoliłoby na opracowanie w bazie danych specjalnych algorytmów, prognozujących wyniki pracochłonności czy opłacalności wytwarzania zupełnie nowych rodzin OS.

---

## Rozdział 5.

### Cel, założenia i plan pracy

#### 5.1 Wnioski z analizy literatury

Na podstawie przedstawionego w poprzednich rozdziałach przeglądu literatury, konsultacji przeprowadzonych w środowisku przemysłowym oraz własnych obserwacji i doświadczeń można stwierdzić, iż:

- współczesne systemy CAD/CAM zawierają mechanizmy umożliwiające automatyzację prac projektowych w zakresie konstrukcyjnego oraz technologicznego, przygotowania produkcji, w tym automatyzacji programowania procesu obróbki,
- automatyzacja programowania procesów obróbki może być realizowana za pomocą narzędzi dostępnych w komercyjnych systemach CAM i wspierana rozwiązaniami klasy KBE,
- istnieje duża potrzeba automatyzacji w zakresie programowania obróbki części produkcyjnego oprzyrządowania specjalnego.

Przeszkodą w rozwoju rozwiązań zautomatyzowanych w procesie programowania obróbki, w szczególności części OS jest brak:

- sprawdzonych i szeroko dostępnych i metodyk automatycznego programowania procesów obróbki, zwłaszcza wzorców proceduralnych,
- narzędzi, umożliwiających odpowiednie gromadzenie i zapisywanie wiedzy wypracowanej w przedsiębiorstwie na podstawie zebranych doświadczeń,
- reguł pozwalających ocenić zasadność automatyzacji programowania w zależności od liczby części tworzących rodzinę OS, stopnia ich podobieństwa oraz trudności wykonania.

Przedstawione powyżej spostrzeżenia upoważniają do stwierdzenia, że konieczne jest poszukiwanie nowych metod automatyzacji programowania obrabiarek CNC, zwłaszcza w odniesieniu do wytwarzania specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego. Za podejmowanie prac w tym zakresie przemawiają także względy techniczne i ekonomiczne, gdyż:

- programowanie obróbki części OS wpływa w znacznym stopniu na całkowite koszty wytwarzania wyrobów finalnych,
- w przypadku rodzin części OS występuje duże podobieństwo cech geometrycznych.

Należy także zauważyć, że automatyzacja programowania obrabiarek CNC w procesie wytwarzania OS jest zadaniem nietrywialnym, ponieważ:

- nie istnieją wzorce i schematy metodyczne opisujące sposób postępowania w przypadku rodzin części OS,
- nie istnieją dedykowane narzędzia przetwarzania wiedzy inżynierskiej, wspomagające proces automatyzacji obróbki OS.

## 5.2 Cel i hipoteza badawcza pracy

Kierując się powyższymi spostrzeżeniami i przesłankami jako podstawowy, główny cel pracy przyjęto opracowanie metodyki automatyzacji programowania obrabiarek CNC w kontekście obróbki skrawaniem specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego, umożliwiającej, w sposób proceduralny, przetwarzanie specjalistycznej wiedzy inżynierskiej do postaci dedykowanych szablonów obróbki<sup>7</sup> rodziny części, minimalizujących udział inżyniera w procesie programowania obrabiarek CNC.

Postawiono także hipotezę, że automatyzacja programowania obrabiarek CNC umożliwia:

- a) skrócenie czasu przygotowania programów obróbki,
- b) poprawę jakości programów obróbki,
- c) obniżenie kosztów wykonania oprzyrządowania.

Zakłada się przy tym osiągnięcie następujących rezultatów cząstkowych:

- opracowanie narzędzi do akwizycji wiedzy o procesie technologicznym dla rodzin części oprzyrządowania,
- opracowanie narzędzia do oceny korzyści stosowania metodyki automatyzacji programowania obrabiarek CNC z wykorzystaniem szablonów obróbki dla rodziny

---

<sup>7</sup> Szablonami obróbki nazywa się wzorce przebiegu obróbki, zapisane w bazie danego systemu, zawierające informacje na temat kolejności oraz ilości operacji i zabiegów, wykorzystywanych podczas obróbki narzędzi i ich parametrów, a także strategii poruszania się narzędzi w określonych zabiegach.

---

części oraz wypracowanie tzw. dobrej praktyki przy tworzeniu szablonów obróbki w programie CAM.

### 5.3 Założenia i plan badań

Metodyka automatyzacji programowania obrabiarek CNC, określana skrótem ACPUT (ang. Automatic CAM Programming Using Machining Templates), będąca przedmiotem rozprawy, jest przeznaczona dla inżynierów – technologów, wykorzystujących w programowaniu procesu obróbki systemy CAM. Z praktycznego punktu widzenia, będzie to procedura postępowania, pozwalająca przygotować w systemie CAM specjalne narzędzia (szablony obróbki), skracające czas przygotowania programów obróbki dla danej rodziny części<sup>8</sup> specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego.

Budowa szablonu będzie kluczowym etapem metodyki, choć o skuteczności jego działania decydować będzie jakość pozyskanej i zapisanej wiedzy. Dlatego w celu ułatwienia przygotowania szablonów obróbki zostaną opracowane i zweryfikowane narzędzia z zakresu inżynierii wiedzy, ułatwiające pozyskiwanie i zapisywanie konkretnych danych oraz informacji o przebiegu procesu programowania obrabiarek CNC. Narzędzia w postaci aplikacji bazodanowej utworzone zostaną w oprogramowaniu MS Access. Narzędzia powinny być uniwersalne, pozwalające na akwizycję wiedzy ogólnej i szczegółowej (jawnej i ukrytej), m.in. o:

- stosowanych obrabiarkach,
- stosowanych do obróbki narzędziach,
- odpowiednich wartościach parametrów obróbki,
- doborze strategii obróbkowej,
- stosowanych w przedsiębiorstwie normach ogólnych i wewnątrzzakładowych.

W założeniu metodyka będzie skupiać się na wspomaganie projektowania procesu technologii obróbki danej rodziny części, wykorzystując przygotowaną wcześniej bazę wiedzy. Zostaną opracowane narzędzia pozwalające na ocenę korzyści stosowania automatyzacji programowania procesów obróbki dla danej rodziny części. Należy podkreślić, że metodyka

---

<sup>8</sup> Pod pojęciem **rodziny części** należy rozumieć zbiór wariantów oprzyrządowania, przeznaczony do produkcji różnych wariantów danego wyrobu. Najczęściej na jeden wariant wyrobu przypada jeden wariant oprzyrządowania (pojedyncza część lub zespół części). Liczebność rodziny wynosi przeważnie od kilku do kilkudziesięciu wariantów.



---

nie odnosi się do konkretnego systemu CAM ani do określonego typu specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego (np. tylko uchwyty spawalnicze).

Opracowana metodyka zostanie poddana walidacji dla trzech wybranych przykładów specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego:

1. OS1 - narzędzia montażowe rur układu chłodzącego (liczba wariantów – 50 szt.),
2. OS2 - elementy pozycjonujące przyrządów spawalniczych do spawania laserowego (liczba wariantów – 10 szt.),
3. OS3 - elementy pozycjonujące przyrządów spawalniczych do zgrzewania punktowego (liczba wariantów – 100 szt.).

Ocena skuteczności oraz efektywności zastosowania metodyki automatycznego programowania obróbki zostanie przeprowadzona na drodze analizy porównawczej programów obróbki opracowanych w sposób:

- a) automatyczny - przygotowane według nowej metodyki (baza wiedzy i szablon obróbki),
- b) konwersacyjny (tradycyjny) - przygotowane przez programistów CAM o różnym poziomie doświadczenia (z dostępem do bazy wiedzy).

W badaniach weźmie udział 10 programistów: 5 początkujących oraz 5 doświadczonych.

Analiza porównawcza zostanie przeprowadzona w odniesieniu do:

1. czasu przygotowania programów obróbki dla poszczególnych części rodziny OS [czas - min];
2. czasu obróbki każdej z części rodziny OS [czas - min];
3. średniego kosztu przygotowania programów obróbki i kosztów wytworzenia części [koszt - EUR].

---

## Rozdział 6.

# Metodyka automatyzacji programowania obrabiarek CNC

### 6.1 Założenia do metodyki ACPUT

Metodyka ACPUT dotyczy przygotowania programów obróbki części specjalnego oprzyrządowania produkcyjnego. W szczególności:

- jest dedykowana rodzinom części OS,
- porządkuje sposób postępowania przy automatycznym tworzeniu programów obróbki,
- wykorzystuje narzędzia przetwarzania wiedzy.

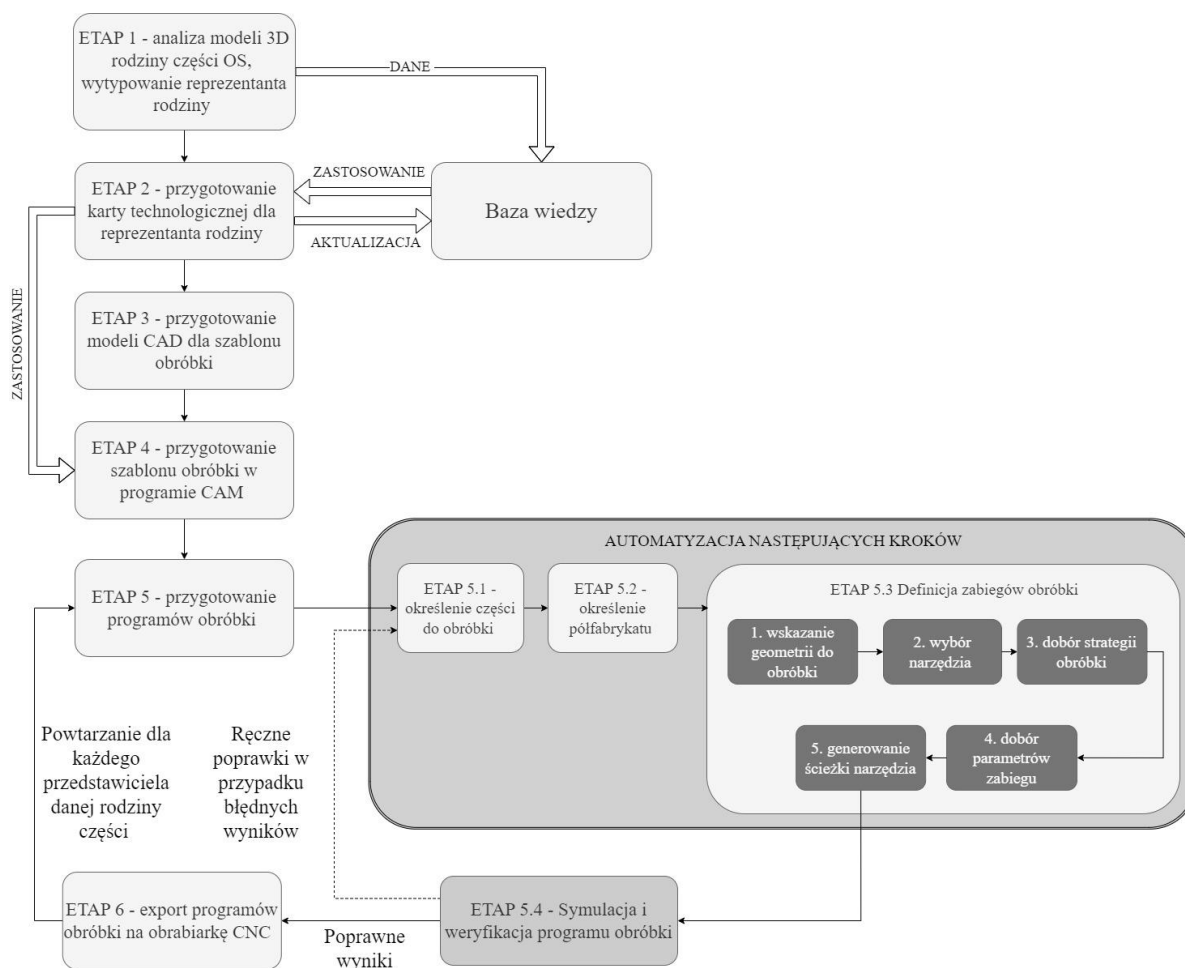
Metodyka obejmuje następujące kroki (rys. 6.1):

1. Analiza modeli 3D rodziny części oprzyrządowania specjalnego
2. Przygotowanie karty technologicznej
3. Przygotowanie modeli CAD dla szablonu obróbki
4. Przygotowanie szablonu obróbki w programie CAM
5. Przygotowanie programów obróbki
6. Export programów obróbki na obrabiarkę CNC

Analiza rodziny części OS, polega na określeniu podobieństwa technologicznego i stopnia złożoności technologicznej (liczba operacji i zabiegów). Analiza ta umożliwia przygotowanie dla rodziny części karty technologicznej. W oparciu o dane z karty technologicznej dokonuje się oceny zasadności automatyzacji programowania. Następnie przygotowywane są modele CAD części umożliwiające odniesienie się do ich cech geometrycznych<sup>9</sup> w systemie CAM. Przygotowana wcześniej karta technologiczna i modele CAD pozwalają na stworzenie szablonu obróbki. W oparciu o szablon tworzone są programy obróbki poszczególnych części rodziny. Następnie dokonuje się weryfikacji poprawności programów obróbki za pomocą symulacji. Jeżeli symulacja wykaże błędy wprowadza się poprawki i generuje się programy obróbki na obrabiarkę CNC.

---

<sup>9</sup> Przez cechę geometryczną autor rozumie elementy części takie jak: otwory, kieszenie, fazowania, zaokrąglenia, czopy, rowki



Rys. 6.1 Schemat metodyki ACPUT

Celem zaproponowanej metodyki automatyzacji procesu programowania CAM jest minimalizacja czasu przygotowania programów obróbki części OS poprzez eliminację powtarzających się dla każdej części z rodziny OS czynności. Umożliwia to szablon obróbki, który stanowi reprezentację wszystkich operacji technologicznych. Zaproponowano przygotowanie specjalnego miejsca zapisu danych i informacji potrzebnych do zbudowania takiego szablonu - bazy wiedzy. Wiedzę pozyskaną głównie od specjalistów danej dziedziny, gromadzi się i zapisuje w sposób formalny do postaci zrozumiałej przez program komputerowy. Aby zapewnić właściwe działanie szablonu obróbki, a tym samym automatyzację procesu przygotowania programów obróbki, modele 3D oprzyrządowania muszą być najpierw odpowiednio opisane w programie CAD (kategoryzacja cech geometrycznych oraz technologicznych i przypisanie ich do modelu CAD). Właśnie na podstawie tego opisu w szablonie obróbki wewnątrz systemu CAM możliwe będzie automatyczne dobieranie odpowiednich dla danej części zabiegów obróbki.

## 6.2 Etapy metodyki ACPUT

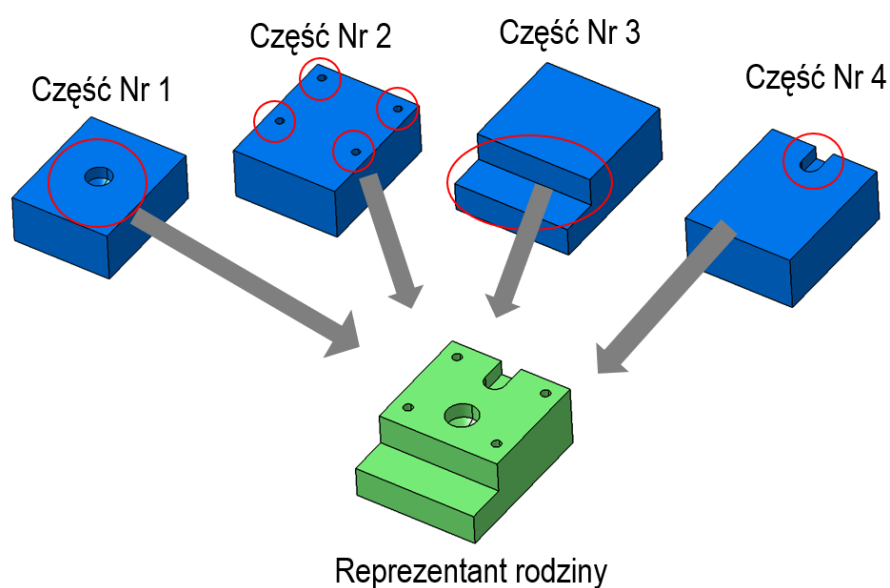
### 6.2.1 Etap 1 - analiza modeli 3D rodziny części oprzyrządowania specjalnego, wytypowanie reprezentanta rodziny

Celem analizy modeli 3D rodziny części jest przygotowanie (lub wskazanie, jeżeli istnieje) tzw. geometrycznego reprezentanta rodziny, czyli takiego wariantu części, który byłby zbiorem wszystkich cech geometrycznych danej rodziny. Na tym etapie pomija się wartości opisujące poszczególne cechy jak średnica otworu, głębokość rowka itd. Pierwszym krokiem jest więc analiza wszystkich części, wchodzących w skład danej rodziny, sprawdzając ich technologiczność oraz wyznaczając typy zabiegów obróbki. Niezbędne jest wyszukanie podobieństw geometrycznych części i określenie ich wariantów.

Na rys. 6.2 przedstawiono przykład obrazujący powstawanie geometrycznego reprezentanta rodziny. Każdy z czterech pokazanych wariantów części (kolor niebieski) posiada pewną wyróżniającą go cechę geometryczną. Na etapie analizy należy zatem każdą z tych cech rozpoznać i przygotować jej opis, określając nazwę cechy i parametry ją opisujące:

1. dla części Nr 1. otwór {położenie, średnica, głębokość},
2. dla części Nr 2. otwory {położenie, średnica, głębokość, ilość},
3. dla części Nr 3. kieszeń otwarta {położenie, długość, szerokość, głębokość},
4. dla części Nr 4. rowek {położenie, długość, szerokość, głębokość}.





Cechy opisujące reprezentanta, a zatem i całą rodzinę należy wprowadzić do przygotowanej bazy wiedzy.



Rys. 6.2 Powstawanie reprezentanta rodziny

## 6.2.2 Etap 2 – przygotowanie karty technologicznej

Efektom drugiego etapu prac jest karta technologiczna (rys. 6.3), przygotowywana dla reprezentanta rodziny części. Zapis wiedzy o sposobach obróbki powinien być wzbogacany opisami kontekstowymi, zdjęciami, obrazami modeli 3D, komentarzami. Ponadto należy pamiętać o możliwościach edycji (aktualizacji) wprowadzanych danych lub zmiany wyników w przypadku wykonania prób czy testów. Ogół informacji tego typu stanowi bowiem zasób przedsiębiorstwa i powinien być ogólnie dostępny dla całego zespołu inżynierów. Dlatego w ramach metodyki proponuje się przygotowanie i stosowanie odpowiednio przygotowanej bazy wiedzy<sup>10</sup>, dającej możliwość nie tylko zapisu procesu wytwórczego w postaci marszruty, ale pozwalającej na zarządzanie i przetwarzanie danych, wypracowanych wewnątrz przedsiębiorstwa.

Nazwa karty technologicznej	Karta technologiczna Mocowania			Data	2022-02-25 r.							
Opis	Mocowania Warsztatowe											
Nazwa rodziny części	Mocowania			Liczebność	4							
Opis rodziny	Mocowania przykładowe			Obrabiarka	AVIA VMC 1000							
				Pracownik	Frezer							
Nazwa operacji	Mocowania OP#1			Oznaczenie operacji	M_OP#1							
	Parametry zabiegów											
Nazwa zabiegu	Rodzaj obróbki	Typ zabiegu	Narzędzie	Głębokość skrawania [mm]	Głębokość obróbki otworu [mm]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość skrawania [m/min]	Prędkość posuwu [mm/obr]/[mm/ząb]	Sposób poruszania się narzędzia	Kierunek ruchu narzędzia	Geometria obróbki
Frezowanie kieszeni otwartej Mocowania	Frezowanie	Obróbka po konturze	F-10	5	n/a	3	3	100	0,06	W tą i z powrotem	Współbieżny	
Frezowanie rowka Mocowania	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-8	1	n/a	1	8	80	0,04	Trochoidalny	Przeciwbieżny	
Wiercenie otworu przelotowego 12mm Mocowania	Wiercenie	Wiercenie głębokich otworów	W-12	n/a	30	n/a	n/a	100	0,1	Wiercenie z usuwaniem wiórów	Prawe	
Wiercenie otworów przelotowych 5mm Mocowania	Wiercenie	Wiercenie głębokich otworów	W-5	n/a	30	n/a	n/a	80	0,06	Wiercenie z usuwaniem wiórów	Prawe	

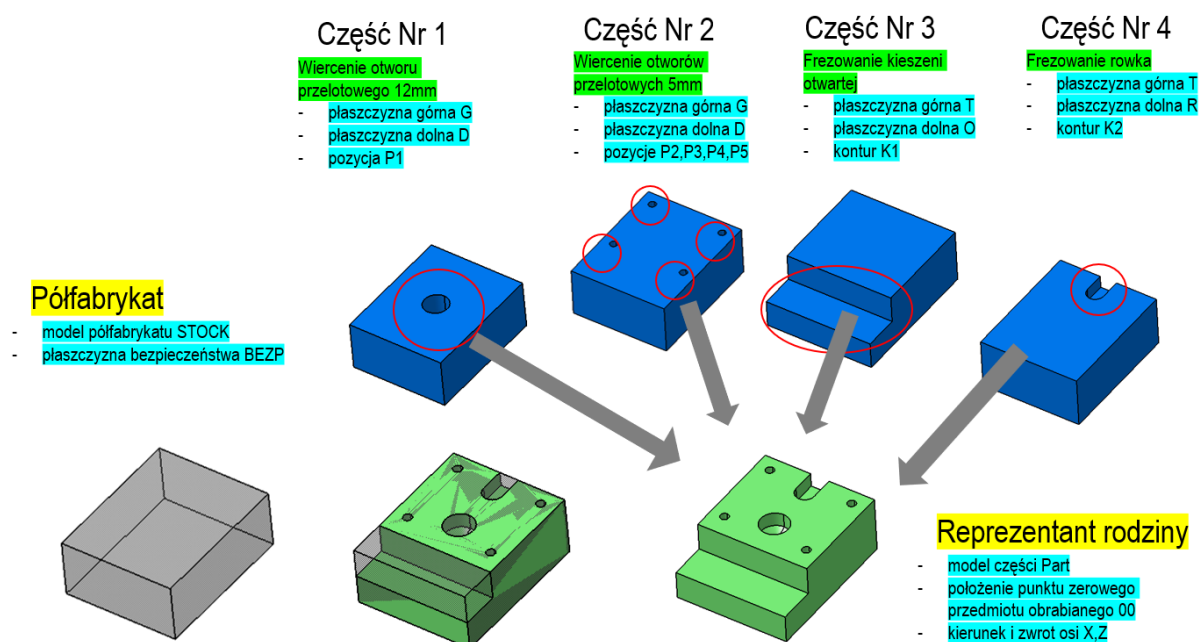
Rys. 6.3 Przykład karty technologicznej obróbki reprezentanta wybranej rodziny

## 6.2.3 Etap 3 – przygotowanie modeli CAD dla szablonu obróbkowego

W kolejnym etapie prac na podstawie wcześniej przygotowanej analizy wariantów rodziny części (Etap 1), a także na podstawie przygotowanej karty technologicznej (Etap 2) należy opisać modele 3D tzn. nazwać elementy geometryczne, tak aby powiązać je z zaplanowanymi zabiegami technologicznymi. Opis ten ma kluczowe znaczenie, gdyż na jego bazie do danego wariantu części są przypisane automatycznie odpowiednie cykle obróbkowe. Opis, dodawany

<sup>10</sup> Strukturę, założenia oraz przykład bazy wiedzy do obsługi metodyki ACPUT przedstawiono w rozdziale 7

do modeli 3D ma charakter metadanych, a sama geometria (kształt elementów geometrycznych) nie ma na tym etapie znaczenia. Oznacza to np. że określone powierzchnie części mają być obrabiane zgodnie z opisem zabiegu w karcie technologicznej. Dla wyjaśnienia - bazując na przykładzie przedstawionym na rys. 6.4 – do poszczególnych zabiegów (na rysunku opisanych tekstem w kolorze zielonym), wytypowano zbiór metadanych (opisanych tekstem w kolorze niebieskim), który w dalszym kroku, na bazie szablonu obróbki, pozwoli przypisać odpowiednie cykle obróbki w sposób automatyczny. Określony cykl obróbki jest zatem automatycznie przypisywany każdej powierzchni/pozycji/konturowi o określonej nazwie w każdej części w całej rodzinie części. Podobnie opisany powinien zostać półfabrykat oraz reprezentant rodziny (na rys. 6.4 oznaczone kolorem żółtym), które zawierają metadane niezbędne do wykonania symulacji i wygenerowania programu obróbczego.

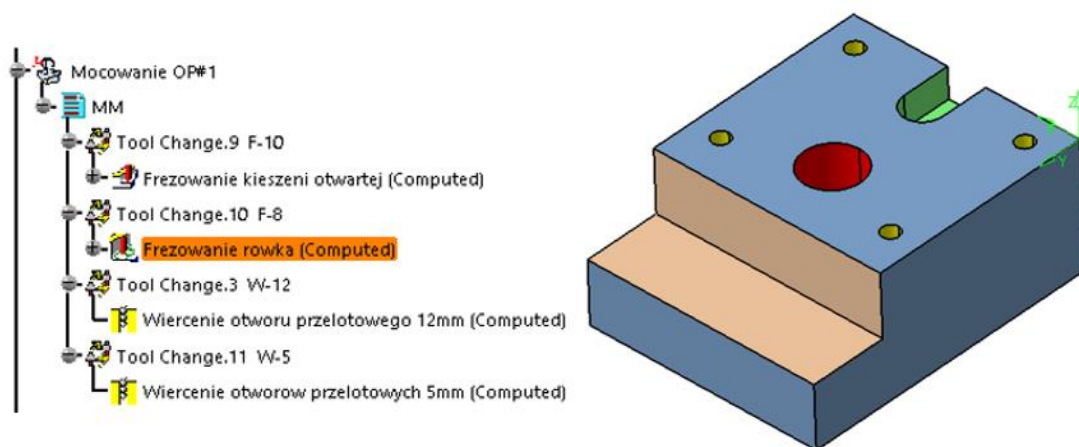


Rys. 6.4 Opis metadanych na wybranym reprezentancie rodziny

#### 6.2.4 Etap 4 – przygotowanie szablonu obróbki

Szablon obróbki jest w procesie programowania odpowiednikiem geometrycznego reprezentanta rodziny (rys. 6.5). Stanowi zbiór wszystkich rozpoznanych w etapie 2 zabiegów i tak jak uogólniony model CAD, może być tworem, który w pełnej postaci nie będzie miał w swojej rodzinie odzwierciedlenia. Jego postać musi być uogólniona, gdyż ma obejmować wszystkie możliwe do wykonania dla całej rodziny części zabiegi. Tworząc szablon obróbki należy więc bazować na modelu geometrycznego reprezentanta oraz na przygotowanej dla

niego karcie technologicznej. Każda rozpoznana i zdefiniowana wcześniej cecha geometryczna modelu CAD musi mieć swoją reprezentację w szablonie obróbki.



Rys. 6.5 Widok szablonu obróbki dla geometrycznego reprezentanta danej rodziny części

### 6.2.5 Etap 5 – przygotowanie programów obróbki

Kolejny etap realizacji procedury ACPUT związany jest z wygenerowaniem programów obróbki dla poszczególnych części danej rodziny.

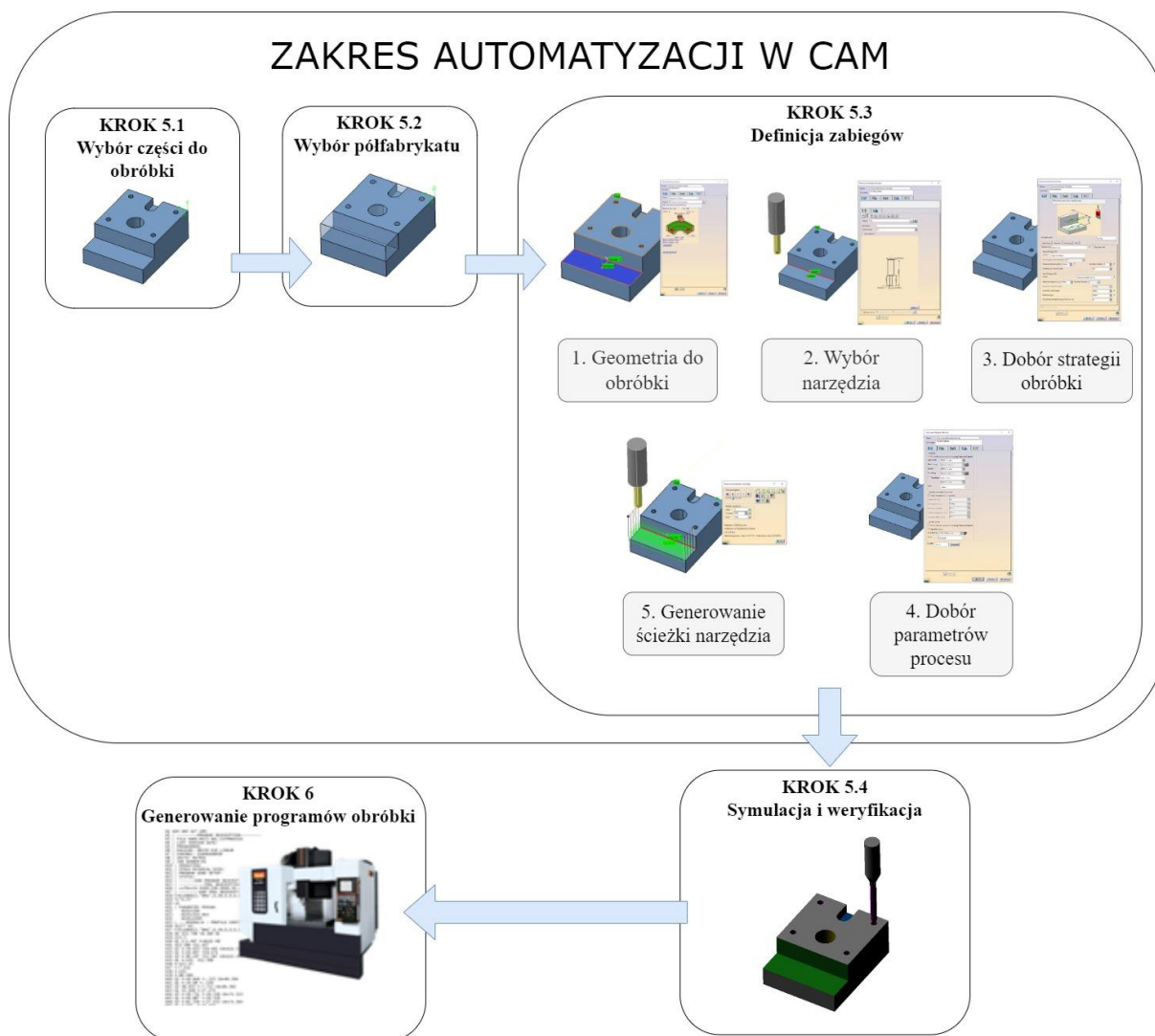
Przygotowanie programu obróbki metodą konwersacyjną opisano w rozdziale 2. W oparciu o ten opis na potrzeby metodyki ACPUT wyodrębniono następujące czynności (rys. 6.6):

- wybór <sup>11</sup> części do obróbki;
- wybór półfabrykatu;
- definiowanie zabiegów, w tym:
  - wskazanie geometrii do obróbki w danym zabiegu,
  - wybór narzędzia skrawającego dla danego zabiegu,
  - dobór strategii obróbki dla danego zabiegu,
  - dobór parametrów procesu dla danego zabiegu,
  - generowanie ścieżki narzędzia w danym zabiegu;
- symulacja i weryfikacja procesu obróbki całego przedmiotu;
- generowanie programów obróbki.

Zakres automatyzacji, zgodnie z rys. 6.6, obejmuje kroki od 5.1 (wybór części do obróbki) do kroku 5.3, kończącego się generowaniem ścieżki narzędzia dla obróbki danej części.

<sup>11</sup> Pod pojęciem „wybór” należy rozumieć wskazanie w strukturze programu obróbki konkretnego obiektu geometrycznego (modelu CAD 3D). Plik programu obróbki zawierać może odniesienia do modeli: przedmiotu obrabianego, półfabrykatu, narzędzi pomocniczych (np. stół), mocowań itp.

Automatyzacja polega na tym, że na podstawie przygotowanego szablonu obróbki a także dzięki opisowi metadanych wewnątrz modelu CAD danej części oraz przygotowanym skryptom, system CAM w sposób automatyczny aktualizuje dane wejściowe zabiegów. Zabiegi, dla których brak jest odpowiednich danych wejściowych (np. nazwa powierzchni) zostają w strukturze programu wyłączone (deaktywowane).



Rys. 6.6 Zakres automatyzacji programowania CAM w metodyce ACPUT

Ostatnie kroki w tym etapie realizacji metodyki ACPUT są związane z przeprowadzeniem symulacji obróbki i weryfikacji wyników. Kroki te muszą być nadzorowane przez programistę. Metodyka ACPUT nie zakłada automatyzacji kontroli poprawności przygotowanych programów. Z obserwacji autora wynika, że systemy CAM czasami generują niepoprawne trajektorie narzędzi, niezgodne z założeniami projektowymi, mogące powodować np. kolizje narzędzia z obrabianą częścią. Są to sytuacje rzadkie, ale ze względu na poważne następstwa



tych błędów (uszkodzenie narzędzia, uszkodzenie obrabianej części czy uszkodzenie obrabiarki) weryfikacja przez programistę jest konieczna. W celu weryfikacji wygenerowanych programów obróbczych można wykorzystać do tego specjalne komercyjne symulatory np. VERICUT, NCSIMUL.

Osiągnięcie satysfakcjonujących wyników symulacji i pozytywna ocena programu na poziomie programowania pozwala na przejście do ostatniego etapu procedury, mianowicie generowania programów obróbki (etap 6). W przypadku wyników negatywnych, należy wprowadzić manualnie zmiany w programie obróbki, ponownie przeprowadzić symulację i weryfikację a następnie wygenerować program obróbki.

#### **6.2.6 Etap 6 – export programów obróbki na obrabiarkę CNC**

Ostatnim krokiem metodyki ACPUT jest przygotowanie i export finalnej postaci programów obróbki, uwzględniających wymogi konkretnego układu sterowania obrabiarki, na której dany program będzie uruchamiany. Zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 2 w tym kroku za pomocą postprocesora odbywa się proces translacji kodu z systemu CAM na język obrabiarki CNC. Możliwe jest generowanie programu NC dla danej części bezpośrednio po jego weryfikacji lub zbiorczo dla całej rodziny części.

---

## Rozdział 7.

# Aplikacja bazodanowa wspomagająca stosowanie metodyki ACPUT

### 7.1 Projekt aplikacji bazodanowej

Podstawowym celem przygotowywanej aplikacji bazodanowej była organizacja procesu gromadzenia i przetwarzania wiedzy z zakresu projektowania procesu technologicznego. W ujęciu praktycznym natomiast, celem budowy aplikacji było przyspieszenie i uproszczenie procesu przygotowania kart technologicznych, na bazie których według ACPUT, przygotowywane są szablony obróbki rodziny części. Wprowadzenie informatycznego narzędzia do obsługi tego procesu miało również na celu wypracowanie standardów pracy w biurze technicznym, zapewniając także dostęp do archiwalnych, sprawdzonych rozwiązań. Ponadto cyfrowa postać karty miała również zastąpić jej papierową wersję, ułatwiając dystrybucję dokumentacji wewnątrz przedsiębiorstwa.

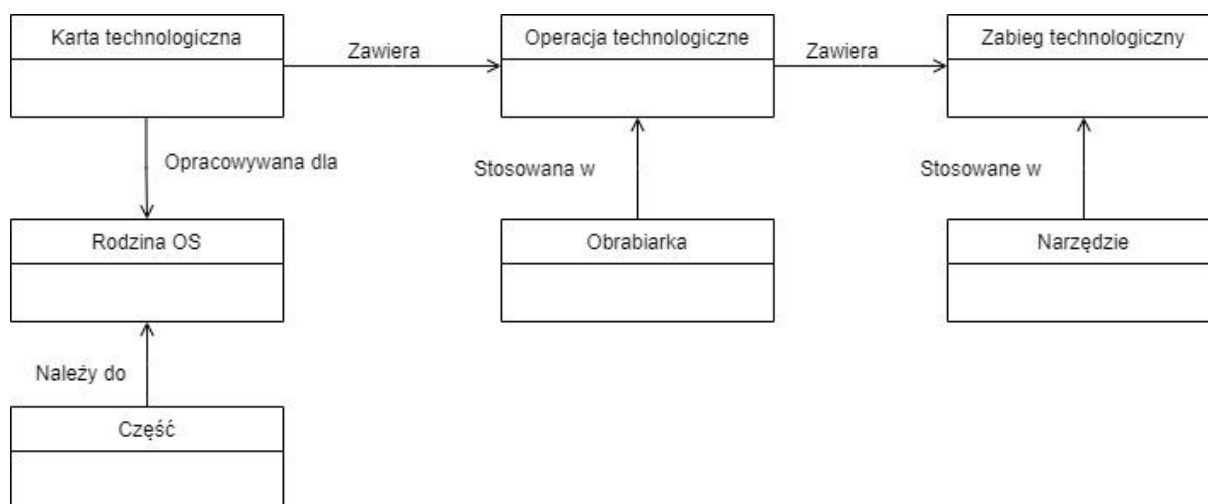
Biorąc pod uwagę powyższe oczekiwania zdefiniowano następujące wymagania funkcjonalne:

- definiowanie projektu technologicznego dla danej rodziny OS;
- dodawanie wariantów części do danej rodziny OS;
- definiowanie operacji technologicznych;
- definiowanie zabiegów technologicznych;
- definiowanie zasobów narzędzi do obróbki;
- definiowanie zasobów obrabiarek;
- aktualizacja danych projektowych po obróbce;
- generowanie kart technologicznych w postaci cyfrowej;
- prognozowanie czasu programowania na podstawie archiwalnych projektów;
- przetwarzanie danych liczbowych, tekstowych oraz możliwość dodawania rysunków lub obrazów.

Ponieważ badania walidacyjne prowadzone były w wybranym przedsiębiorstwie w projekcie aplikacji bazodanowej zawarto również szczegółowe wymagania нефункционалне, dostosowane do jego potrzeb:

- przyrost danych: 2-4 rodzin OS na kwartał;
- serwer lokalny, dostęp do zasobów w biurze technicznym przedsiębiorstwa;
- liczba użytkowników końcowych: 1-3.

Prace projektowe rozpoczęto od opracowania modelu konceptualnego aplikacji bazy danych w notacji BPMN (Business Process Model and Notation, rys. 7.1). Model konceptualny jest bardzo ogólną reprezentacją bazy danych, ma na celu schematyczny opis wymagań biznesowych i jest niezależny od docelowego rozwiązania informatycznego. W modelu konceptualnym nie uwzględnia się szczegółowej struktury bazy danych, ale jedynie określa się podstawową zawartość modelu bazy. Pozwala to na wstępne zdefiniowanie koncepcji bazy i uporządkowanie założeń.



Rys. 7.1 Model konceptualny projektowanej bazy danych w notacji BPMN

## 7.2 Implementacja aplikacji bazodanowej

Opracowana struktura bazy wiedzy została zaimplementowana w postaci aplikacji bazodanowej, opracowanej w oprogramowaniu MS Access. Jednym z celów budowy aplikacji było uproszczenie procesu przygotowania kart technologicznych w metodyce ACPUT. Przygotowanie elektronicznych kart technologicznych, w oparciu o bazę danych umożliwia szybkie jej stworzenie oraz edycję i standaryzuje proces projektowania technologii w biurze technicznym, gdyż umożliwia dostęp do archiwalnych, sprawdzonych rozwiązań. Ponadto cyfrowa postać karty zastępuje jej papierową wersję i ułatwia jej dystrybucję wewnątrz przedsiębiorstwa, gdyż może być wysyłana zdalnie na stanowiska produkcyjne.

Do obsługi aplikacji przygotowano graficzny interfejs (rys. 7.2), pozwalający poruszać się po niej w prosty sposób. Opisując nową rodzinę części użytkownik bazy (technolog) zaczyna od definicji zabiegów, następnie ze zdefiniowanych zabiegów tworzy operacje technologiczne oraz finalnie kartę technologiczną. Karta jest uzupełniania danymi o dostępnych w przedsiębiorstwie obrabiarkach oraz o niezbędnych narzędziach skrawających. Dlatego też podstawowy podział zasobów bazy dzieli się na formularze:

- rodziny części,
- obrabiarki,
- narzędzia,
- zabiegi technologiczne,
- operacje technologiczne,
- karty technologiczne.



Rys. 7.2 Widok interfejsu aplikacji bazodanowej

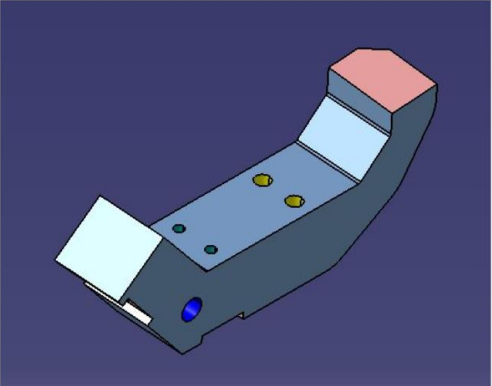
### Rodziny części

Formularz „rodziny części” umożliwia wprowadzenie, edycję oraz przegląd danych dotyczących rodzin części (rys. 7.3-7.5). Każda z wprowadzonych rodzin posiada nazwę, opis, informację na temat liczebności rodziny oraz informacje szczegółowe na temat części do niej

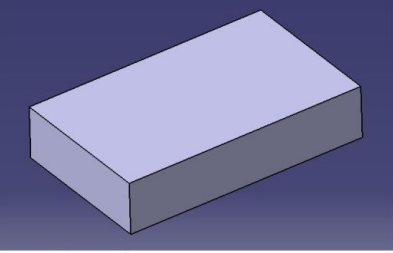
należących. Możliwe jest również dodanie do bazy plików modeli 3D, rysunków technicznych 2D oraz obrazów.

Nazwa rodziny:	Rosan Nowa Winda #1	Wybierz rodzinę części																																				
Opis rodziny:	Materiał: POLIAMID Firma: ROSAN	Rosan Nowa Winda #1 Formy TRI W&W Laser form Mikro L Bracket																																				
Liczebność rodziny:	7																																					
Lista części należących do rodziny:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa części</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>01_030_winda_dachow_26032020</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>01_031_winda_dachow_26032020</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>01_033_winda_dachow_26032020</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>01_034_winda_dachow_26032020</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>*</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Nazwa części						01_030_winda_dachow_26032020						01_031_winda_dachow_26032020						01_033_winda_dachow_26032020						01_034_winda_dachow_26032020						*						
Nazwa części																																						
01_030_winda_dachow_26032020																																						
01_031_winda_dachow_26032020																																						
01_033_winda_dachow_26032020																																						
01_034_winda_dachow_26032020																																						
*																																						
Rekord: 1 z 4		Przełącz filtru Wyszukaj																																				
		Przełączaj części																																				

Rys. 7.3 Formularz „rodziny części” – przegląd zasobów

Spis dostępnych części		
Nazwa:	01_031_winda_dachow_26032020	Wybierz rodzinę
Opis:	Element windy	Rosan Nowa Winda #1
Półfabrykat:	Półfabrykat	Przełączaj półfabrykaty
Plik CAD:	01_031_winda_dachow_26032020	Pokaż wszystkie części
Podgląd:		Wybierz część
		<ul style="list-style-type: none"> <li>01_030_winda_dachow_26032020</li> <li>01_031_winda_dachow_26032020</li> <li>01_033_winda_dachow_26032020</li> <li>01_034_winda_dachow_26032020</li> </ul>

Rys. 7.4 Formularz „rodziny części” – podgląd wybranej części

Spis dostępnych półfabrykatów		
Nazwa półfabrykatu:	Półfabrykat_01_031_winda_dachow_26032020	Wybierz półfabrykat
Szerokość [mm]:	199	Pol-M02G -TRI I
Długość [mm]:	74	Pol-M03D -TRI I
Wysokość [mm]:	40	Pol-M03G -TRI I
Rysunek półfabrykatu:		Pol-M04D -TRI I
		Pol-M04G -TRI I
		Pol-M05D -TRI I
		Pol-M05G -TRI I
		Pol-M06D -TRI I
		Pol-M06G -TRI I
		Pol-M07D -TRI I
		Pol-M07G -TRI I
		Pol-M08D -TRI I
		Pol-M08G -TRI I
		Pol-M09D -TRI I
		Pol-M09G -TRI I
		Pol-M10D -TRI I
		Pol-M10G -TRI I
		Półfabrykat_01_030_winda_dachow_26032020
		Półfabrykat_01_031_winda_dachow_26032020
		Półfabrykat_01_033_winda_dachow_26032020
		Półfabrykat_01_034_winda_dachow_26032020

Rys. 7.5 Formularz „rodziny części” – podgląd dostępnych półfabrykatów

Korzystając z formularza „rodziny części” technolog może również, na podstawie określenia przewidywanej liczby operacji i zabiegów w poszczególnych operacjach, określić

prognozowany czas niezbędny na przygotowanie programów obróbki (rys. 7.6). Czas ten jest obliczany na podstawie przechowywanych w bazie danych o zrealizowanych w przeszłości projektach (procesach technologicznych). Szczegóły sposobu obliczania prognozowanego czasu przygotowania programów obróbki przedstawiono w rozdziale 8.

Liczba operacji		Operacja #1		Operacja #2	
Liczba zabiegów w operacji	10	Liczba zabiegów w operacji	6		
Czas przygotowania programu CAM I części (szablon)	0	Czas przygotowania programu CAM I części (szablon)	0		
Czas przygotowania programu CAM I części (początkujący)	0	Czas przygotowania programu CAM I części (początkujący)	0		
Czas przygotowania programu CAM I części (ekspert)	22	Czas przygotowania programu CAM I części (ekspert)	0		
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (szablon)	0	Średni czas przygotowania programu CAM n- części (szablon)	0		
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (początkujący)	0	Średni czas przygotowania programu CAM n- części (początkujący)	0		
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (ekspert)	5	Średni czas przygotowania programu CAM n- części (ekspert)	0		
Całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	0	Całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	0		
Całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	0	Całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	0		
Całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	52	Całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	0		
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	123,88	Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	74,31		
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	215,45	Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	129,28		
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	109,64	Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	65,75		

Rys. 7.6 Formularz „rodziny części” – prognozowanie czasu czas przygotowania programu obróbki

## Obrabiarki

Wprowadzenie, edycja oraz przegląd danych, dotyczących (rys. 7.7) dostępnych obrabiarek odbywa się za pomocą formularza „obrabiarki”. Każda z wprowadzonych do bazy danych obrabiarek posiada podstawowe informacje na temat nazwy, producenta, modelu obrabiarki jak również informacje potrzebne do projektowania procesu technologicznego, a wśród nich następujące: liczba sterowanych osi, przestrzeń robocza, przesuw w poszczególnych osiach czy też rodzaj sterowania.

Spis dostępnych obrabiarek		
Nazwa obrabiarki	DMG DMU 50ECO	Wybierz obrabiarkę AVIA VMC 1000 DMG CMX 1100V DMG CMX 70U DMG DMU 50ECO Doosan DNM 6700 Mikron VCE 800 Pro
Producent	DMG	
Model	DMU 50ECO	
Liczba sterowanych osi	3+2	
Przestrzeń robocza	500x500x500	
Przesuw w osiach sterowanych	500x450x400	
Rodzaj sterowania	Siemens 840D	
<input type="button" value="↻"/> <input type="button" value="↶"/>		

Rys. 7.7 Formularz „obrabiarki” – przegląd zasobów bazy

## Narzędzia

Formularz „narzędzia” przeznaczony jest do wprowadzania, edycji oraz przeglądu (rys. 7.8) informacji na temat dostępnych narzędzi. Każde z wprowadzonych do modułu narzędzi opisane jest danymi obejmującymi nazwę narzędzia zastosowaną do niego oprawkę mocującą jak również informacje potrzebne do projektowania procesu technologicznego a wśród nich: typ narzędzia (głowica frezująca, frez, wiertło, rozwiertak itd.) oraz wymiary.

Spis dostępnych narzędzi

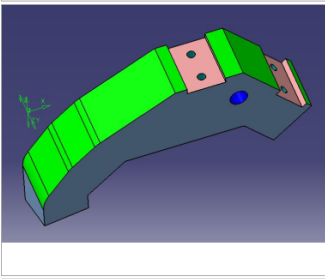
Nazwa narzędzia	F-10-DO-R2	Typ narzędzia	Frez
Typ	Frez	Pokaż wszystkie narzędzia	
Średnica	10.00	Wyszukaj narzędzie	
Długość	48.00	<ul style="list-style-type: none"> <li>F-10</li> <li>F-10-DO-R0</li> <li>F-10-DO-R1</li> <li><b>F-10-DO-R2</b></li> <li>F-12-KOMET</li> <li>F-6</li> <li>F-6-2P</li> <li>F-6-DO</li> <li>F-6-R3</li> <li>G-12</li> <li>G-25</li> </ul>	
Promień naroża	2.0		
Oprawka	Oprawka hydrauliczna Eroglu 403.65.10.80		

Rys. 7.8 Formularz „narzędzia” – przegląd zasobów bazy

## Zabiegi technologiczne

Każdy z wprowadzonych zabiegów technologicznych zdefiniowany jest na formularzu „zabiegi technologiczne” (rys. 7.9) poprzez: nazwę, opis oraz informację umożliwiającą zaprogramowanie zabiegu technologicznego w systemie CAM (rodzaj oraz typ zabiegu, narzędzie, parametry obróbki itd.). Możliwe jest dołączenie do określonego zabiegu technologicznego rysunków pomocniczych. Ważną funkcją ułatwiającą szybkie tworzenie zabiegów technologicznych jest możliwość ich tworzenia na podstawie wcześniej zarchiwizowanych zabiegów, segregując je na podstawie nazwy czy też rodziny dla których zostały stworzone.

Spis dostępnych kart zabiegów

Nazwa zabiegu	Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1	Wybierz operację Rosan Nowa Winda 30 31 33 34 OP#1
Opis zabiegu	Frezowanie zgrubna powierzchni oznaczonych na zielono	Wybierz rodzinę
Geometria		Pokaż wszystkie zabiegi Przełączaj dostępne zabiegi technologiczne
Rodzaj obróbki	Frezowanie	Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1 Obróbka kieszeni Rosan Nowa Winda #1 Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1 Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1 <b>Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1</b> Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1 Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1 Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1 Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1 Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1
Typ zabiegu	Obróbka zgrubna	
Narzędzie	F-10-DO-R2	
Głębokość skrawania [mm]	5	
Szerokość skrawania [mm]	10	
Dystans między przejściami [mm]	5	
Prędkość skrawania [m/min]	0	
Prędkość posuwu [mm/ząb]	0	
Sposób poruszania się narzędzia	Helikalny	
Kierunek ruchu narzędzia	Dowolny	

Rys. 7.9 Formularz „zabiegi technologiczne” – przegląd zasobów bazy

## Operacje technologiczne

Każda z wprowadzonych operacji technologicznych definiowana jest za pomocą formularza „operacje technologiczne” (rys. 7.10) poprzez: nazwę, oznaczenie, opis, informację na jakiej obrabiarkie i przez kogo ma być zrealizowana oraz listę zabiegów wchodzących w skład operacji. Podobnie jak w przypadku formularza zabiegów technologicznych możliwe jest szybkie tworzenie operacji technologicznych na podstawie wcześniej zarchiwizowanych, segregując je na podstawie nazwy czy też rodziny dla których zostały stworzone.



**Spis dostępnych operacji**

Nazwa operacji	Rosan Nowa Winda 30 31 33 34 OP#1	Wybierz kartę technologiczną												
Ozaczenie operacji	RNW_30313334_1													
Opis operacji	Operacja obróbki plastików ustalających nowej windy	Pokaż wszystkie dostępne operacje												
Obrabiarka	DMG DMU 50ECO	Wybierz operację												
Wykonawca	Frezer	Mikro L Bracket OP#1												
Lista zabiegów	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa zabiegu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	Nazwa zabiegu	Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1	Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1	Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1	*	Rosan Nowa Winda 30 31 33 34 OP#1
Nazwa zabiegu														
Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1														
Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1														
Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1														
Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1														
*														
		Rosan Nowa Winda 30 31 33 34 OP#2												
		TRI Formy OP#1												
		W&W Laser form OP#1												

Rekord: 1 z 10

Rys. 7.10 Formularz „operacje technologiczne” – przegląd zasobów bazy

## Karty technologiczne

Do tworzenia, edycji oraz przeglądu kart technologicznych jest stosowany formularz „karty technologiczne” (rys. 7.11) Każda z wprowadzonych kart technologicznych zdefiniowana jest poprzez nazwę, opis, oraz przypisanie do określonej rodziny części. Podobnie jak w przypadku formularzy „operacje technologiczne” oraz „zabiegi technologiczne” możliwe jest szybkie tworzenie nowych kart technologicznych na podstawie kart wcześniej zarchiwizowanych, segregując je na podstawie nazwy czy też rodziny, dla których zostały stworzone.

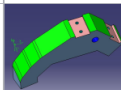
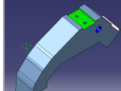
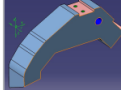
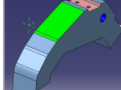
**Spis dostępnych kart technologicznych**

Nazwa karty technologicznej	Karta Technologiczna Rosan winda	Wybierz kartę technologiczną																				
Opis karty technologicznej	Mocowania windy wykonane z poliamidu	Karta technologiczna Mikro																				
Rodzina części	Rosan Nowa Winda #1	Karta Technologiczna Rosan winda																				
Data wykonania	2020-06-22 r.	Karta Technologiczna TRI																				
Liczba operacji w procesie:	2	Karta technologiczna W&W																				
Lista zabiegów w operacji:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa zabiegu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	Nazwa zabiegu	Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1	Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1	Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1	Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1	Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1	*	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa zabiegu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>Obróbka pokonturze Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni II Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni III Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszni V Rosan Nowa Winda #2</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	Nazwa zabiegu	Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #2	Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #2	Obróbka pokonturze Rosan Nowa Winda #2	Obróbka kieszni II Rosan Nowa Winda #2	Obróbka kieszni III Rosan Nowa Winda #2	Obróbka kieszni V Rosan Nowa Winda #2	*
Nazwa zabiegu																						
Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #1																						
Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka promienia zewnętrznego I Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka powierzchni II Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka promienia zewnętrznego II Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka promienia zewnętrznego III Rosan Nowa Winda #1																						
Obróbka powierzchni III Rosan Nowa Winda #1																						
Wiercenie głębokich otworów II Rosan Nowa Winda #1																						
*																						
Nazwa zabiegu																						
Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #2																						
Obróbka kieszni Rosan Nowa Winda #2																						
Obróbka pokonturze Rosan Nowa Winda #2																						
Obróbka kieszni II Rosan Nowa Winda #2																						
Obróbka kieszni III Rosan Nowa Winda #2																						
Obróbka kieszni V Rosan Nowa Winda #2																						
*																						

Rekord: 1 z 6

Rys. 7.11 Formularz „karty technologiczne” – przegląd zasobów bazy

Formularz „Karty technologiczne” posiada również możliwość wygenerowania karty technologicznej (rys. 7.12) przeznaczonej do wydrukowania i przekazania na warsztat.

Nazwa karty technologicznej	Karta Technologiczna Rosan winda		Data	2020-06-22	r.							
Opis	Mocowanie windy wykonane z poliamidu											
Nazwa rodziny części	Rosan Nowa Winda #1	Liczebność	7									
Opis rodziny	Materiał: POLIAMID Firma: ROSAN	Obrabiarka	DMG DMU 50ECO									
Nazwa operacji	Rosan Nowa Winda 30 31 33 34 OP#1	Pracownik	Frezer									
Oznaczenie operacji	RNW_30313334_1		1/1									
Parametry zabiegów												
Nazwa zabiegu	Rodzaj obróbki	Typ zabiegu	Narzędzie	Głębokość skrawania [mm]	Głębokość obróbki otworu [mm]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość skrawania [m/min]	Prędkość posuwu [mm/obr]/ [mm/ząb]	Sposób poruszania się narzędzia	Kierunek ruchu narzędzia	Geometria obróbki
Obróbka zgrubna I Rosan Nowa Winda #1	Frezowanie	Obróbka zgrubna	F-10-DO-R2	5	n/a	5	10	0	0	Helikalny	Dowolny	
Obróbka kieszeni Rosan Nowa Winda #1	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-10-DO-R0	4	n/a	5	10	0	0	W tą i z powrotem	Współbieżny	
Wiercenie głębokich otworów Rosan Nowa Winda #1	Wiercenie	Wiercenie głębokich otworów	W-5.5	n/a	50	n/a	n/a	100	200	Wiercenie z usuwaniem wiórow	Prawe	
Obróbka powierzchni I Rosan Nowa Winda #1	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-10-DO-R0	5	n/a	5	10	0	0	W jedną stronę	Współbieżny	

Rys. 7.12 Przykład karty technologicznej wygenerowanej z aplikacji bazodanowej

### 7.3 Ocena opłacalności stosowania metodyki ACPUT

O opłacalności stosowania metodyki ACPUT decyduje przede wszystkim wielkość rodziny części wchodzących w skład oprzyrządowania a także stopień ich skomplikowania technologicznego. Do przeprowadzenia analizy opłacalności metodyki ACPUT służy specjalny moduł obliczeniowy, stanowiący część opracowanej aplikacji bazodanowej, służący do prognozowania czasów przygotowania programów obróbki metodami konwersacyjną oraz według ACPUT.

W bazie danych są archiwizowane czasy przygotowania programów obróbki dla części OS, rysunek 7.13 (na podstawie przygotowanych programów obróbki). Oddzielnie zapisywane są czasy przygotowania programów dla pierwszej oraz kolejnych części z uwzględnieniem sposobu przygotowania programów. Podział na pierwszą i kolejne części wynika z faktu, że czas potrzebny na przygotowanie programu pierwszej części obejmuje również przygotowanie szablonu obróbki wg metodyki ACPUT wykorzystywanego następnie dla całej rodziny części. Obliczenia prognozowanego czasu potrzebnego do przygotowania programów obróbki opierają się o metody predykcji rys. 7.14. Im większa ilość rzeczywistych czasów zostanie wprowadzona do bazy danych tym wynik predykcji będzie bliższy realnym czasom przygotowania programów.

Liczba operacji	1
Operacja #1	
Liczba zabiegów w operacji	21
Czas przygotowania programu CAM I części (szablon)	224
Czas przygotowania programu CAM I części (początkujący)	145
Czas przygotowania programu CAM I części (ekspert)	79
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (szablon)	13,61
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (początkujący)	38
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (ekspert)	22
Całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	890,89
Całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	2007
Całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	1157

Rys. 7.13 Formularz archiwizacji czasów przygotowania programów obróbki

Obliczenia są przeprowadzane na podstawie następujących danych:

- czas przygotowania programu obróbki I części ( $T_{ppI}$ ),
- średni czas przygotowania programu obróbki n-tej części ( $T_{ppn}$ ),
- liczebności rodziny R,
- liczba zabiegów w operacji Z.

W celu obliczenia przewidywanego czasu przygotowania programu należy obliczyć średni czas przygotowania jednego zabiegu w przypadku I części ( $MT_{ppI}$ ) na podstawie zarchiwizowanych, rzeczywistych czasów przygotowania programu obróbki. Obliczenia tego czasu są wykonywane niezależnie dla każdej metody przygotowywania programów. Jeżeli dla danej operacji brakuje informacji o rzeczywistych czasach przygotowania programów operacja ta nie jest uwzględniana w obliczeniach.

$$MT_{ppI} = \frac{\sum_{i=1}^o T_{ppI}(i)}{\sum_{i=1}^o Z(i)}$$

gdzie:

$o$  – ilość operacji w bazie danych,

$T_{ppI}$  – czas przygotowania programu obróbki I części,

$Z$  – liczba zabiegów w operacji.

Następnie obliczany jest średni czas przygotowania jednego zabiegu w przypadku  $n$ -tej części ( $MT_{ppn}$ ) na podstawie na podstawie zarchiwizowanych, rzeczywistych czasów przygotowania programów obróbki zgodnie z zasadami obliczania czasu  $MT_{ppi}$

$$MT_{ppn} = \frac{\sum_{i=1}^o T_{ppn}(i)}{\sum_{i=1}^o Z(i)}$$

gdzie:

$o$  – liczba operacji w bazie danych,

$T_{ppn}$  – średni czas przygotowania programu obróbki  $n$ -tej części,

$Z$  – liczba zabiegów w operacji.

Na podstawie średniego czasu przygotowania jednego zabiegu w przypadku I części  $MT_{ppi}$  oraz ilości zabiegów w nowej operacji  $Z_o$  możliwe jest obliczenie przewidywanego czasu przygotowania programu obróbki I części ( $PT_{ppi}$ ) ze wzoru:

$$PT_{ppi} = MT_{ppi} * Z_o$$

gdzie:

$MT_{ppi}$  – średni czas przygotowania jednego zabiegu w przypadku I części, z obliczeń statystycznych,

$Z_o$  – liczba zabiegów w nowej operacji.

Podobnie - przewidywany średni czas przygotowania programu obróbki  $n$ -tej części w nowej operacji ( $PT_{ppn}$ ):

$$PT_{ppn} = MT_{ppn} * Z_o$$

gdzie:

$MT_{ppn}$  – średni czas przygotowania jednego zabiegu w przypadku  $n$ -tej części, z obliczeń statystycznych,

$Z_o$  – liczba zabiegów w nowej operacji.

Przewidywany całkowity czas przygotowania programu obróbki w nowej operacji  $PT_{pp}$  wyrażony jest wzorem

$$PT_{pp} = PT_{ppi} + PT_{ppn} * (R - 1)$$

gdzie:

$PT_{ppt}$  – przewidywany czas przygotowania programu obróbki I części nowej operacji,

$PT_{ppn}$  – przewidywany średni czas przygotowania programu obróbki n-tej części nowej operacji,

$R$  – ilość części w rodzinie.

Liczba operacji	1
<b>Operacja #1</b>	
Liczba zabiegów w operacji	21
Czas przygotowania programu CAM I części (szablon)	224
Czas przygotowania programu CAM I części (początkujący)	145
Czas przygotowania programu CAM I części (ekspert)	79
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (szablon)	13,61
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (początkujący)	38
Średni czas przygotowania programu CAM n- części (ekspert)	22
Całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	890,89
Całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	2007
Całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	1157
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (szablon)	1070,28
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (początkujący)	2487,24
Przewidywany całkowity czas przygotowania programu CAM (ekspert)	1409,27

Rys. 7.14 Wyniki prognozowanego czasu potrzebnego do przygotowania programów obróbki

## Rozdział 8.

# Walidacja metodyki ACPUT

### 8.1 Wprowadzenie

Do walidacji metodyki ACPUT wytypowano trzy rodziny części oprzyrządowania specjalnego:

- części oprzyrządowania montażowego rur układu chłodzącego (OS1),
- części pozycjonujące oprzyrządowania spawalniczego do spawania laserowego (OS2),
- części pozycjonujące oprzyrządowania spawalniczego do zgrzewania punktowego (OS3).

Rodziny różnią się przeznaczeniem, liczbą części oraz liczbą cech geometrycznych tabela 8.1.

*Tabela 8.1 Porównanie liczby części i liczby cech geometrycznych dla rodzin oprzyrządowania specjalnego*

Numer oprzyrządowania	Liczba części	Liczba cech geometrycznych reprezentanta
OS 1	50	21
OS 2	10	10
OS 3	100	10

Budowę szablonów obróbki i generowanie programów obróbki wykonano w systemie Catia V5. Walidacja polegała na sprawdzeniu skuteczności oraz efektywności samej metodyki w porównaniu z konwersacyjną metodą programowania obrabiarek CNC w systemie CAM, realizowanym przez:

- programistów początkujących – o małym doświadczeniu, ale posiadających przynajmniej 50h oraz nie więcej niż 1000h pracy przy programowaniu obróbki w systemach CAM oraz ukończone kursy z zakresu technologii wytwarzania, procesów obróbki skrawaniem oraz programowania obróbki w systemach CAM (min. 30h dla każdego zakresu);
- programistów doświadczonych – posiadających przynajmniej 2000h pracy przy programowaniu obróbki w systemach CAM oraz ukończone kursy z zakresu grupy

---

programistów początkujących oraz procesów obróbki cieplnej, materiałoznawstwa oraz narzędzi skrawających (min. 60h dla każdego zakresu).

W każdej grupie oprogramowanie przygotowywało niezależnie od siebie 5 programistów.

Jako kryteria walidacji przyjęto:

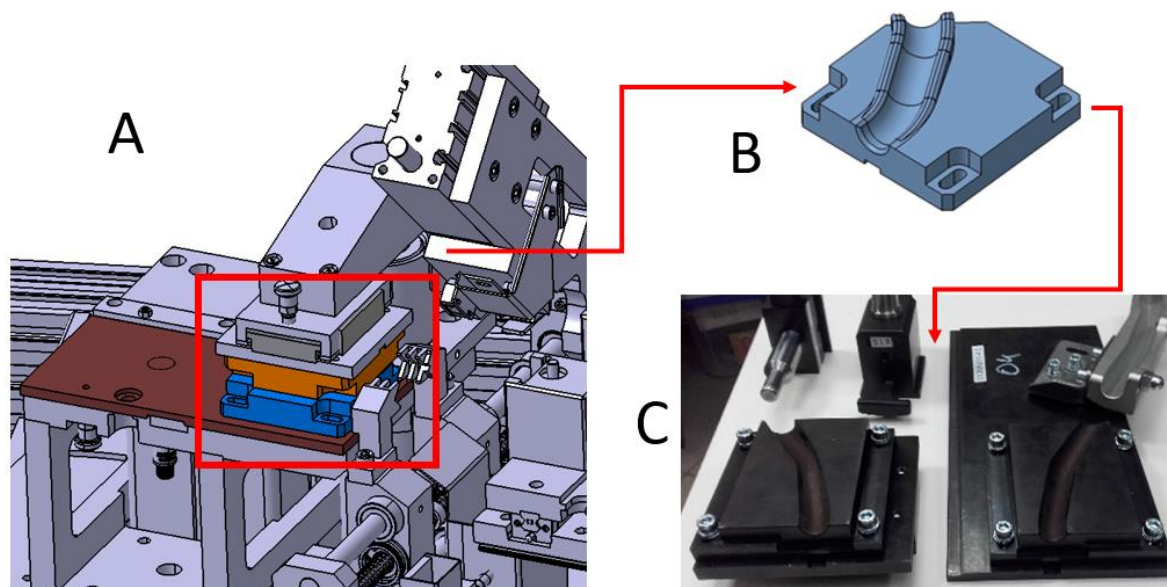
- czas programowania obróbki części oraz całej rodziny OS [czas - min];
- czas obróbki części oraz całej rodziny OS [czas - min];
- koszt programowania oraz koszt obróbki części oraz całej rodziny OS [koszt - EUR].

Prace związane z przygotowaniem programów według ACPUT oraz kart technologicznych zostały przeprowadzone przez autora pracy. Ponadto, dla zachowania zgodności z określonymi wymaganiami procesu obróbki zadbano o to, aby każda grupa programistów miała dostęp do tych samych źródeł wiedzy - kart technologicznych. W przypadku metody ACPUT czas poświęcony na przygotowanie modeli CAD był dodawany do czasu programowania obróbki poszczególnych części rodziny OS, natomiast czas przygotowania szablonu obróbki był dodawany do czasu programowania pierwszej części. Czas generowania programów NC został w podsumowaniu pominięty ze względu na to, że jest on niezależny od metody programowania CAM.

## **8.2 Programowanie obróbki części oprzyrządowania montażowego rur układu chłodzącego**

### **8.2.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS1**

Rodzina oprzyrządowania OS 1 jest stosowana w procesie montażu rur (rys. 8.1), stanowiących część układu chłodzenia silnika spalinowego samochodu osobowego. Rodzina oprzyrządowania składa się z 25 dwuczęściowych form (łącznie 50 szt. części). Dokumentacja ma postać modeli 3D form zapisanych w uniwersalnym formacie „stp”.



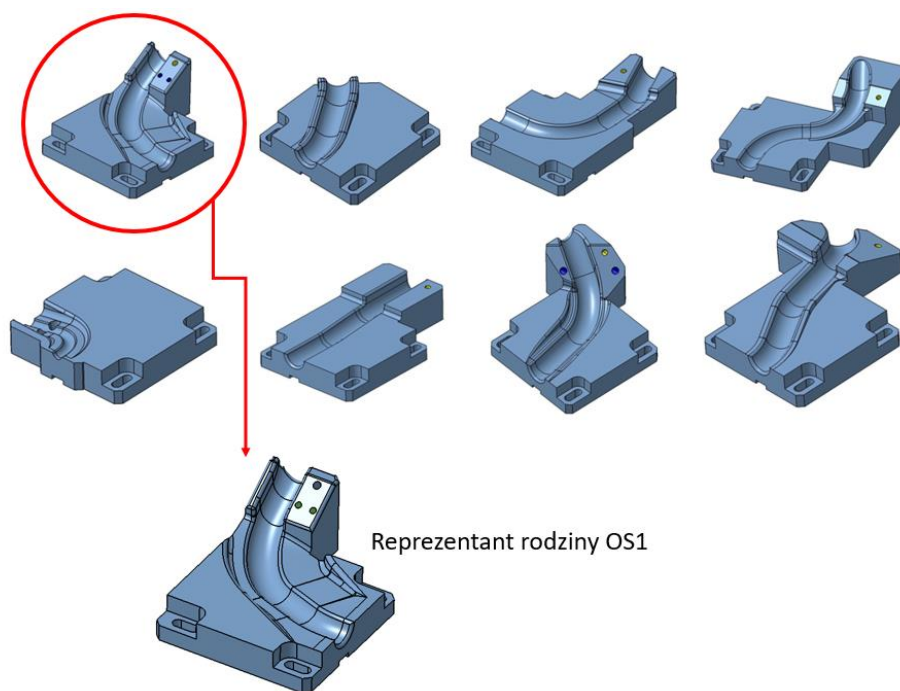
Rys. 8.1 Widok modelu oprzyrządowania montażowego rur (A), modelu CAD wybranej części oprzyrządowania (B) z rodziny OS 1 oraz rzeczywistej postaci oprzyrządowania (C)

### 8.2.2 Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 1 z zastosowaniem metodyki ACPUT

#### Etap 1 – analiza modeli 3D rodziny części oprzyrządowania specjalnego, wytypowanie reprezentanta rodziny

W celu wyłonienia bądź przygotowania reprezentanta rodziny dokonano przeglądu wszystkich części rodziny pod kątem oceny stopnia podobieństwa cech geometrycznych. Wybrano jedną z części posiadającą wszystkie cechy geometryczne obecne w innych częściach rodziny (rys. 8.2).

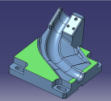
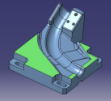
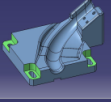
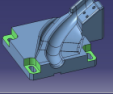




Rys. 8.2 Wybór reprezentanta rodziny OS 1

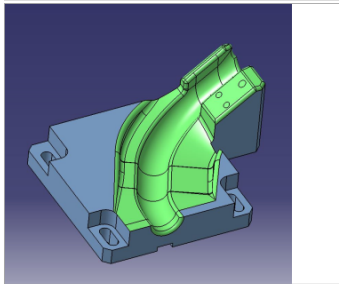


## **Etap 2 – przygotowanie karty technologicznej**

Karta technologiczna (rys. 8.3) utworzona została w autorskiej aplikacji bazodanowej, opisanej w rozdziale 7. Dla zidentyfikowanych cech geometrycznych reprezentanta rodziny zostały utworzone zabiegi technologiczne, np. obróbka kieszeni, obróbka rowków, obróbka otworów oraz obróbka zgrubna i wykańczająca powierzchni (rys. 8.4). Następnie z zabiegów utworzono operację technologiczną, układając je w marszrutę jak na rysunku 8.5. Utworzona karta technologiczna złożona jest z jednej (1) operacji i dwudziestu jeden (21) zabiegów.

Nazwa karty technologicznej	Karta Technologiczna TRI		Data	2021-07-09 r.								
Opis	Formy do rur z BOHLER M230 30HRC											
Nazwa rodziny części	Formy TRI		Liczebność	50								
Opis rodziny	Formy do wciśnięcia rurek		Obrabiarka	DMG DMU 50ECO								
			Pracownik	Frezer								
Nazwa operacji	TRI Formy OP#1		Oznaczenie operacji	OP#1								
Parametry zabiegów												
Nazwa zabiegu	Rodzaj obróbki	Typ zabiegu	Narzędzie	Głębokość skrawania [mm]	Głębokość obróbki otworu [mm]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość skrawania [m/min]	Prędkość posuwu [mm/obr]/[mm/ząb]	Sposób poruszania się narzędzia	Kierunek ruchu narzędzia	Geometria obróbki
Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-10-DO-R2	14	n/a	3	3	120	0,06	Koncentryczny	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-12-KOMET	3	n/a	5	5	80	0,06	Helikalny	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni pod łeb śruby I TRI #1	Frezowanie	Obróbka po konturze	G-12	1,5	n/a	4	4	80	0,04	W tą i z powrotem	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni pod łeb śruby II TRI #1	Frezowanie	Obróbka po konturze	G-12	1,5	n/a	4	4	80	0,04	W tą i z powrotem	Przeciwbieżny	

Rys. 8.3 Karta technologiczna rodziny OS 1

Spis dostępnych kart zabiegów

Nazwa zabiegu	Obróbka powierzchni mocowania rury zgrubnie TRI #1	Wybierz operację
Opis zabiegu	Frezowanie zgrubne powierzchni oznaczonych na zielono	Wybierz rodzinę
Geometria		Formy TRI
Rodzaj obróbki	Frezowanie	Pokaż wszystkie zabiegi
Typ zabiegu	Obróbka zgrubna	Przeglądaj dostępne zabiegi technologiczne
Narzędzie	F-10-DO-R2	Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1
Głębokość skrawania [mm]	0,75	Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1
Szerokość skrawania [mm]	10	Obróbka kieszeni pod łeb śruby I TRI #1
Dystans między przejściami [mm]	5	Obróbka kieszeni pod łeb śruby II TRI #1
Prędkość skrawania [m/min]	120	Obróbka kieszeni pod łeb śruby III TRI #1
Prędkość posuwu [mm/ząb]	0,06	Obróbka kieszeni pod łeb śruby IV TRI #1
Sposób poruszania się narzędzia	Helikalny	Obróbka otworów 6.5mm I TRI #1
Kierunek ruchu narzędzia	Dowolny	Obróbka otworów 6.5mm II TRI #1
	 	Obróbka otworów 6.5mm III TRI #1
		Obróbka otworów 6.5mm IV TRI #1
		Obróbka rowka I TRI #1
		Obróbka rowka II TRI #1
		Obróbka rowka III TRI #1
		Obróbka rowka IV TRI #1
		Obróbka powierzchni mocowania rury zgrubnie TRI #1
		Obróbka narozy zgrubnie TRI #1
		Obróbka powierzchni mocowania rury wykańczająco TRI #1
		Obróbka narozy wykańczająco TRI #1
		Obróbka otworu 5mm TRI #1
		Obróbka otworów 4H7 I TRI #1
		Obróbka otworów 4H7 II TRI #1

Rys. 8.4 Lista zabiegów stworzona dla reprezentanta rodziny OS1

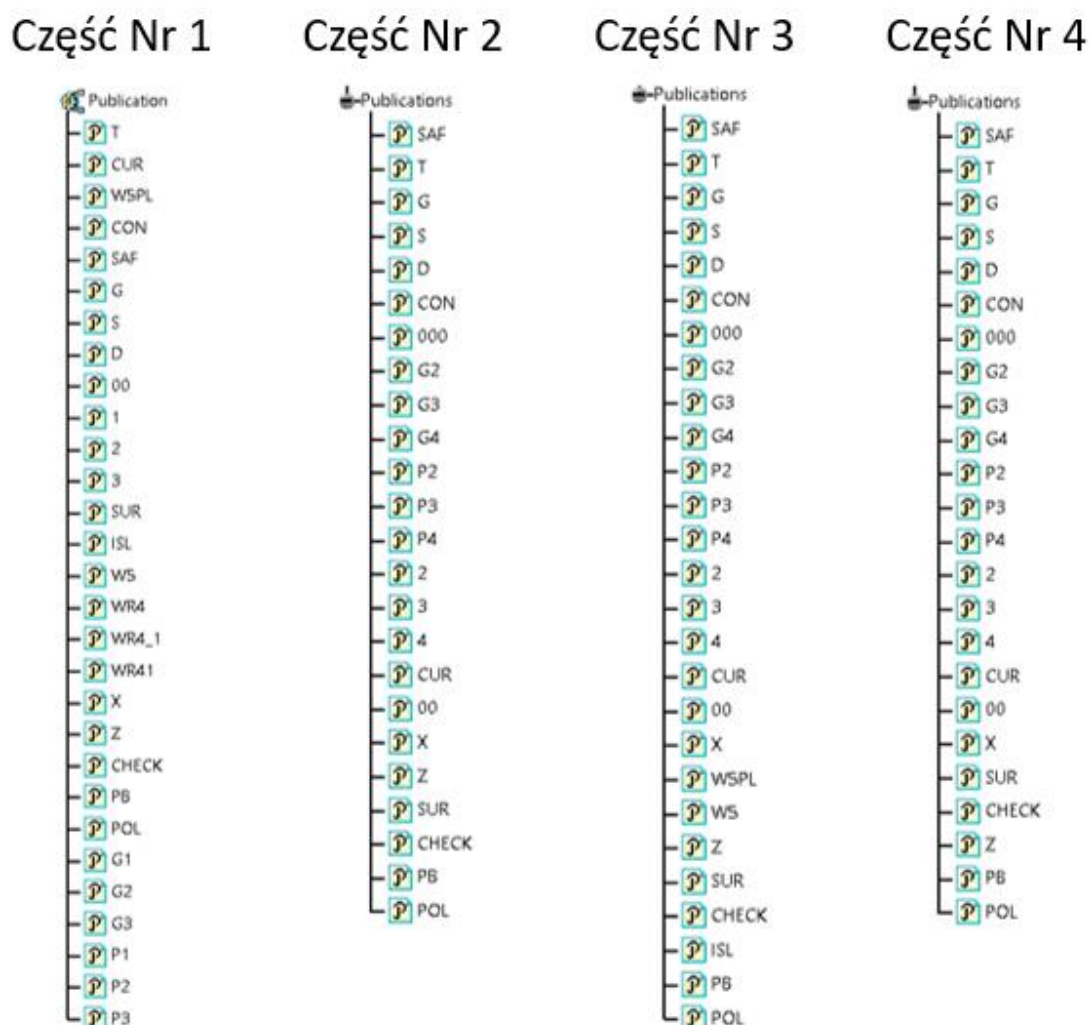
Spis dostępnych operacji

Nazwa operacji	TRI Formy OP#1	Wybierz kartę technologiczną																						
Ozaczenie operacji	OP#1	Karta Technologiczna TRI																						
Opis operacji	Operacja obróbki form	Pokaż wszystkie dostępne operacje																						
Obrabiarka	DMG DMU 50ECO	Wybierz operacje																						
Wykonawca	Frezer	TRI Formy OP#1																						
Lista zabiegów	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa zabiegu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszeni pod łeb śruby I TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszeni pod łeb śruby II TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszeni pod łeb śruby III TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka kieszeni pod łeb śruby IV TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 6.5mm I TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 6.5mm II TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 6.5mm III TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 6.5mm IV TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka rowka I TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka rowka II TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka rowka III TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka rowka IV TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni mocowania rury zgrubnie TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka naroży zgrubnie TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka powierzchni mocowania rury wykańczająco TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka naroży wykańczająco TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworu 5mm TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 4H7 I TRI #1</td></tr> <tr><td>Obróbka otworów 4H7 II TRI #1</td></tr> </tbody> </table>		Nazwa zabiegu	Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1	Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1	Obróbka kieszeni pod łeb śruby I TRI #1	Obróbka kieszeni pod łeb śruby II TRI #1	Obróbka kieszeni pod łeb śruby III TRI #1	Obróbka kieszeni pod łeb śruby IV TRI #1	Obróbka otworów 6.5mm I TRI #1	Obróbka otworów 6.5mm II TRI #1	Obróbka otworów 6.5mm III TRI #1	Obróbka otworów 6.5mm IV TRI #1	Obróbka rowka I TRI #1	Obróbka rowka II TRI #1	Obróbka rowka III TRI #1	Obróbka rowka IV TRI #1	Obróbka powierzchni mocowania rury zgrubnie TRI #1	Obróbka naroży zgrubnie TRI #1	Obróbka powierzchni mocowania rury wykańczająco TRI #1	Obróbka naroży wykańczająco TRI #1	Obróbka otworu 5mm TRI #1	Obróbka otworów 4H7 I TRI #1	Obróbka otworów 4H7 II TRI #1
Nazwa zabiegu																								
Obróbka kieszeni otwartej zgrubnie TRI #1																								
Obróbka kieszeni otwartej wykańczająco TRI #1																								
Obróbka kieszeni pod łeb śruby I TRI #1																								
Obróbka kieszeni pod łeb śruby II TRI #1																								
Obróbka kieszeni pod łeb śruby III TRI #1																								
Obróbka kieszeni pod łeb śruby IV TRI #1																								
Obróbka otworów 6.5mm I TRI #1																								
Obróbka otworów 6.5mm II TRI #1																								
Obróbka otworów 6.5mm III TRI #1																								
Obróbka otworów 6.5mm IV TRI #1																								
Obróbka rowka I TRI #1																								
Obróbka rowka II TRI #1																								
Obróbka rowka III TRI #1																								
Obróbka rowka IV TRI #1																								
Obróbka powierzchni mocowania rury zgrubnie TRI #1																								
Obróbka naroży zgrubnie TRI #1																								
Obróbka powierzchni mocowania rury wykańczająco TRI #1																								
Obróbka naroży wykańczająco TRI #1																								
Obróbka otworu 5mm TRI #1																								
Obróbka otworów 4H7 I TRI #1																								
Obróbka otworów 4H7 II TRI #1																								
	Rekord: 1 z 21	Bez filtru   Wyszukaj																						
	Przeglądaj zabiegi																							

Rys. 8.5 Operacja technologiczna rodziny OSI

### Etap 3 – przygotowanie modeli CAD

Wykonano modyfikację modeli 3D części oprzyrządowania polegającą na utworzeniu zbioru metadanych w postaci elementów geometrycznych, związanych z określonymi zabiegami obróbki. W programie Catia V5 zastosowano tzw. „publikacje”, za pomocą których można identyfikować elementy geometryczne i korzystać z nich w ramach środowiska Catii. Publikacje umożliwiają automatyczne połączenie wybranych elementów geometrycznych danego modelu (np. powierzchni, prostej, konturu, punktu) z cechami geometrycznymi tego modelu. Lista utworzonych metadanych, dodanych do struktury wybranych modeli CAD z OS 1 prezentuje rys. 8.6.

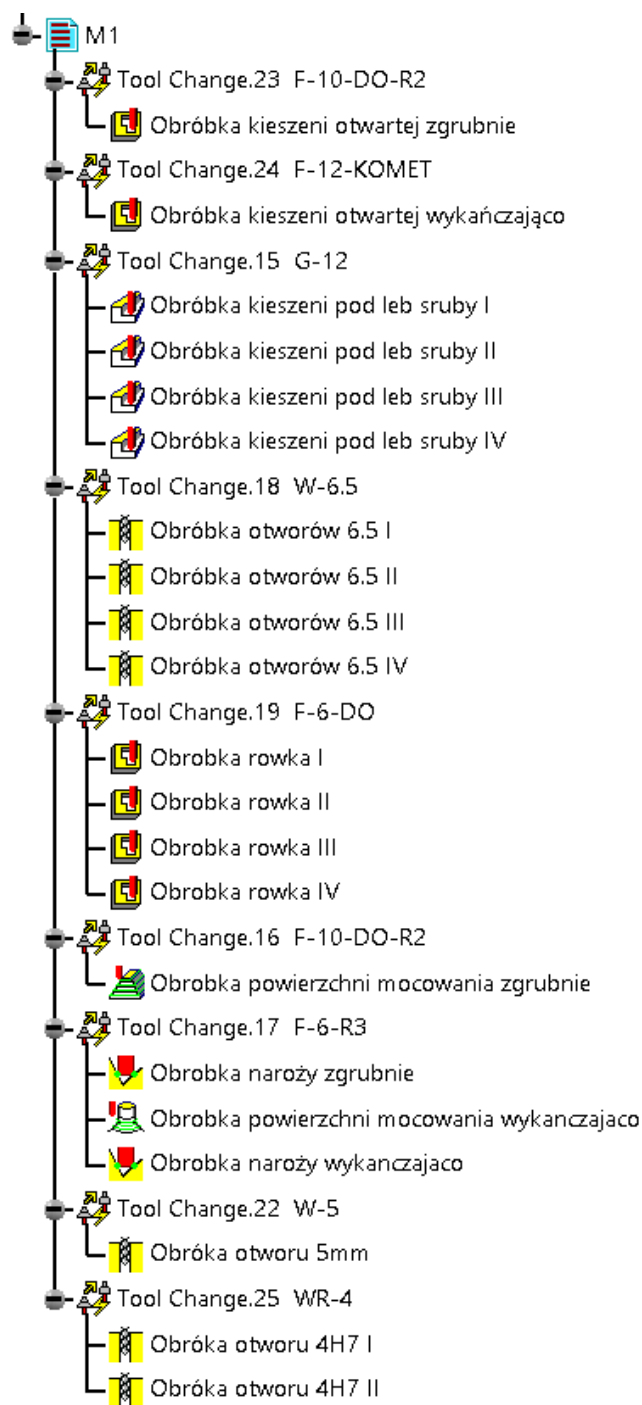


Rys. 8.6 Metadane zapisane w wybranych wariantach części rodziny OS 1

#### **Etap 4 – przygotowanie szablonu obróbki**

Na podstawie utworzonej karty technologicznej przygotowano szablon obróbki. W szablonie obróbki zaimplementowano dane i informacje zawarte w karcie technologicznej dotyczące zarówno obrabiarki, przedmiotu obrabianego oraz zabiegów technologicznych.

Struktura programu obróbki szablonu dla oprzyrządowania OS 1 jest przedstawiona na rysunku 8.7.

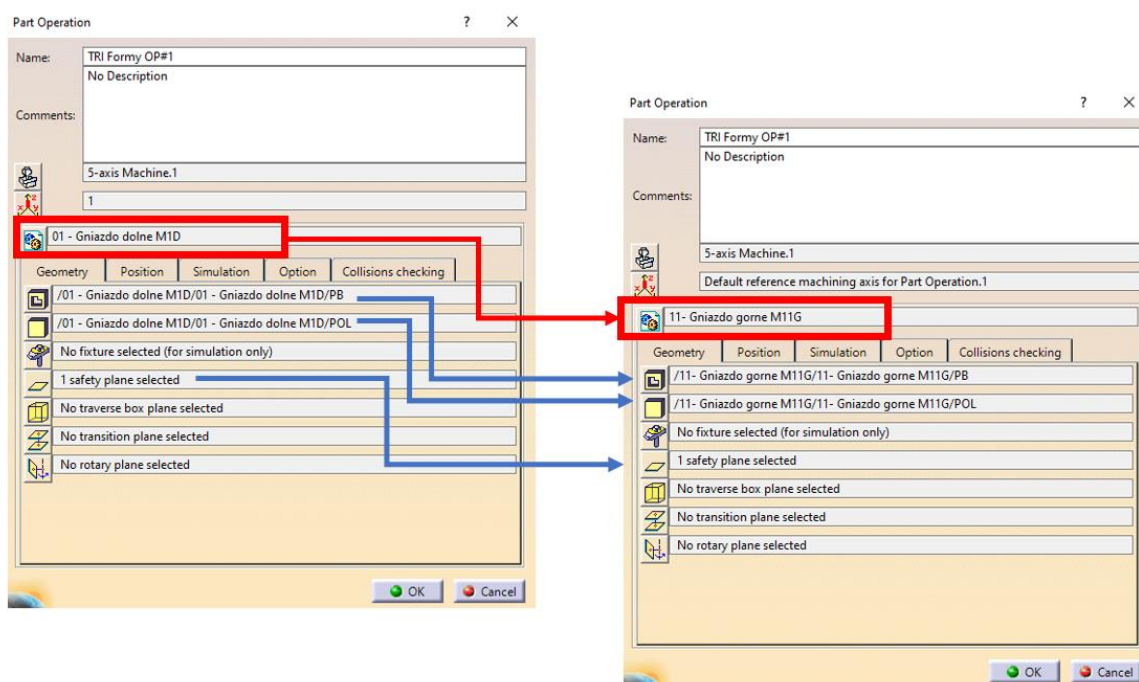


Rys. 8.7 Struktura szablonu obróbki dla OS 1

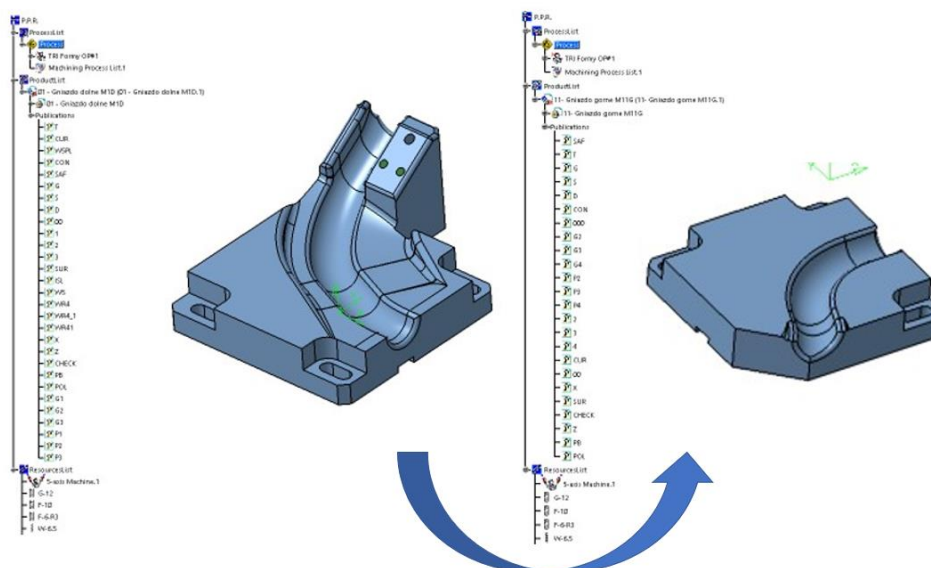
## Etap 5 – przygotowanie programów obróbki

Na przygotowanym szablonie obróbki wskazano część z rodziny oprzyrządowania, dla której ma być zaprogramowany proces obróbki. Program CAM automatycznie wyszukiwał geometrię przedmiotu obrabianego, półfabrykatu, a także ustawiał punkt zerowy przedmiotu obrabianego i rozpoznawał niezbędne powierzchnie, kontury i punkty. Po podmianie

charakterystyczne elementy geometryczne części zostały automatycznie rozpoznane i podmienione w pliku CAM (rys. 8.8, 8.9).



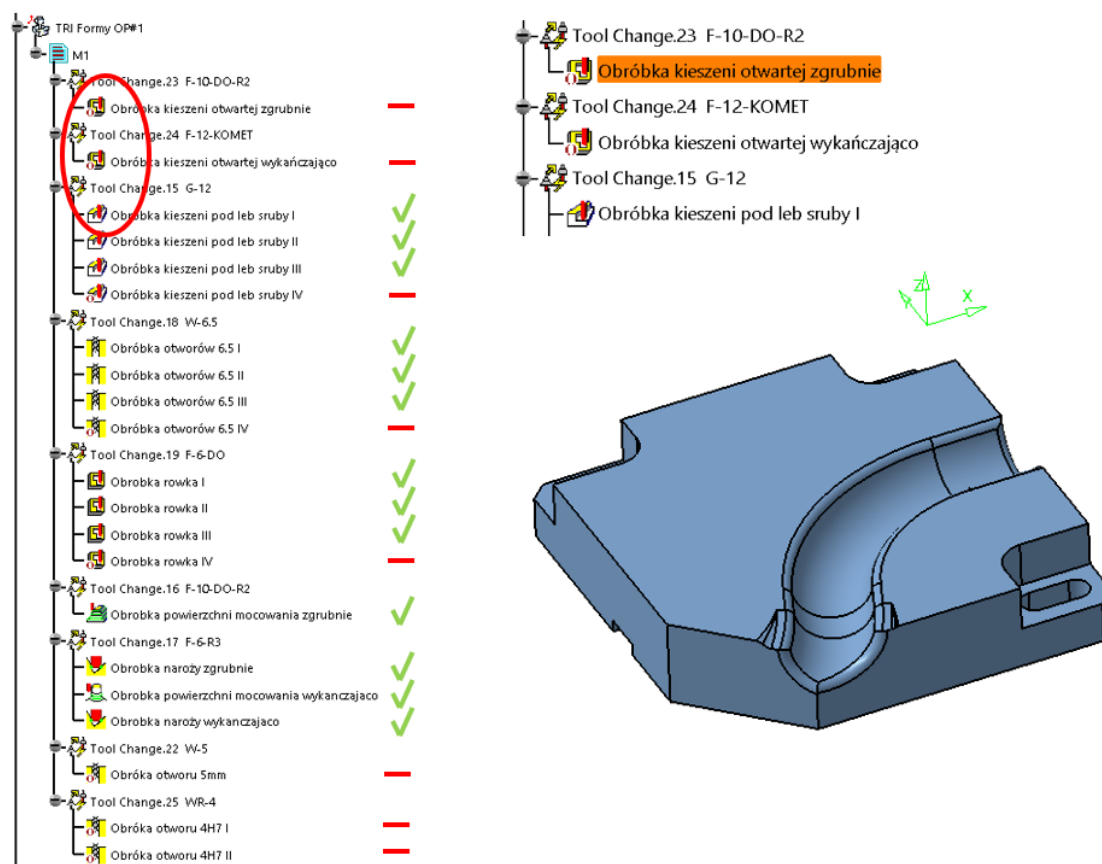
Rys. 8.8 Podmiana danych opisujących wariant części - po lewej poprzedni, po prawej następny



Rys. 8.9 Efekt podmiany danych wejściowych w szablonie

Następnie przystąpiono do procesu generowania ścieżek narzędzia. Dzięki metadaniom zawartym w modelu CAD, aktualizacji ulegała postać programu obróbkowego. Zabiegi, dla których program nie znajdował odpowiednich elementów geometrycznych zostawały

automatycznie wyłączone (w programie Catia V5 następuje tzw. dezaktywacja zabiegu, widoczna na rys. 8.10).



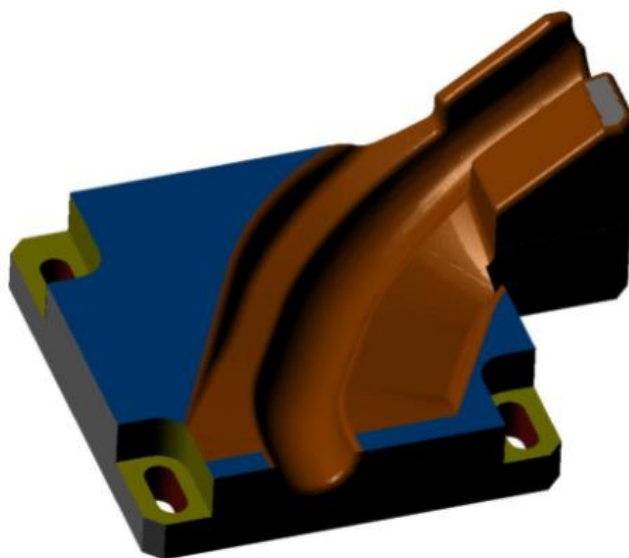
Rys. 8.10 Automatyczny dobór zabiegów na podstawie metadanych modelu części – wyłączenie zabiegów dla nierozpoznanych elementów geometrycznych

Automatyczny dobór zabiegów do konkretnych elementów geometrycznych obrabianej części, wymagał jeszcze wykonania aktualizacji (przeliczenia) trajektorii ruchu narzędzi.

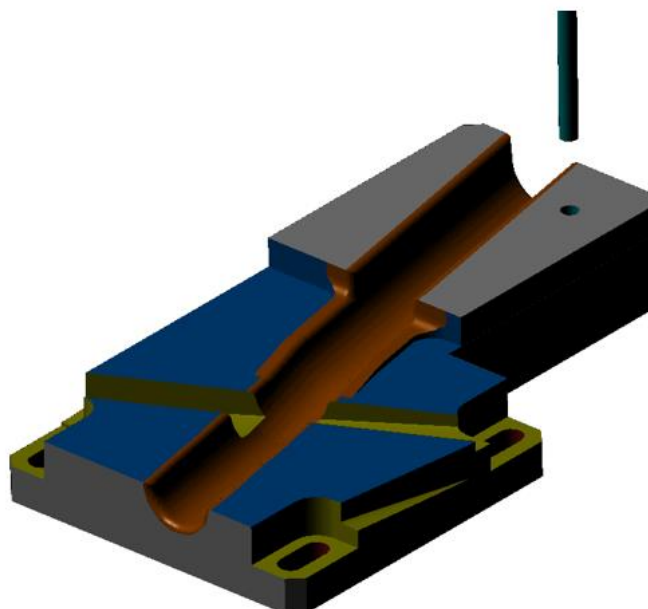
Końcowym etapem było przeprowadzenie symulacji obróbki oraz przeanalizowanie jej przebiegu. Symulacja odtwarzając proces obróbki umożliwia, np. rozpoznanie kolizji narzędzia skrawającego lub ocenę zakresu ruchu osi przesuwnych i obrotowych obrabiarki. Jeżeli wynik symulacji jest w ocenie programisty pozytywny (rys. 8.11), możliwe jest przejście do wygenerowania programu obróbki na wybraną obrabiarkę CNC (translacja postprocesorem – Etap 6).

W trakcie testów wykryto dwa błędnie wygenerowane programy. Przyczyną błędu w pierwszym programie był błąd programisty, który niewłaściwie zdefiniował płaszczyznę bezpieczeństwa SAF (Safety Plane) podczas przygotowywania modelu CAD (Etap 3). W efekcie płaszczyzna bezpieczeństwa była poniżej górnej płaszczyzny półfabrykatu co

skutkowało kolizją narzędzia z przedmiotem obrabianym podczas przejazdu pomiędzy kolejnymi zabiegami (rys. 8.12). W drugim programie (w zabiegu zgrubnej obróbki otwartej kieszeni) dochodziło do „wejścia” narzędzia w obrabianą część z posuwem szybkim (rys. 8.13). Przyczyną była błędnie wygenerowana przez program CAM trajektoria narzędzia, mimo poprawnych założeń projektowych (błąd ten nie wystąpił w innych programach). Konieczna okazała się w tym przypadku ręczna zmiana ustawień sposobu dojścia narzędzia do części.

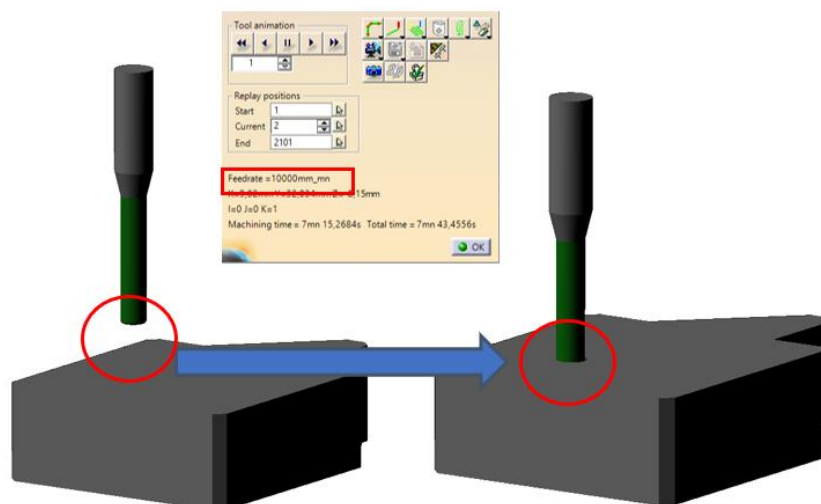


*Rys. 8.11 Prawidłowy wynik symulacji*



*Rys. 8.12 Kolizja narzędzia z obrabianą częścią*



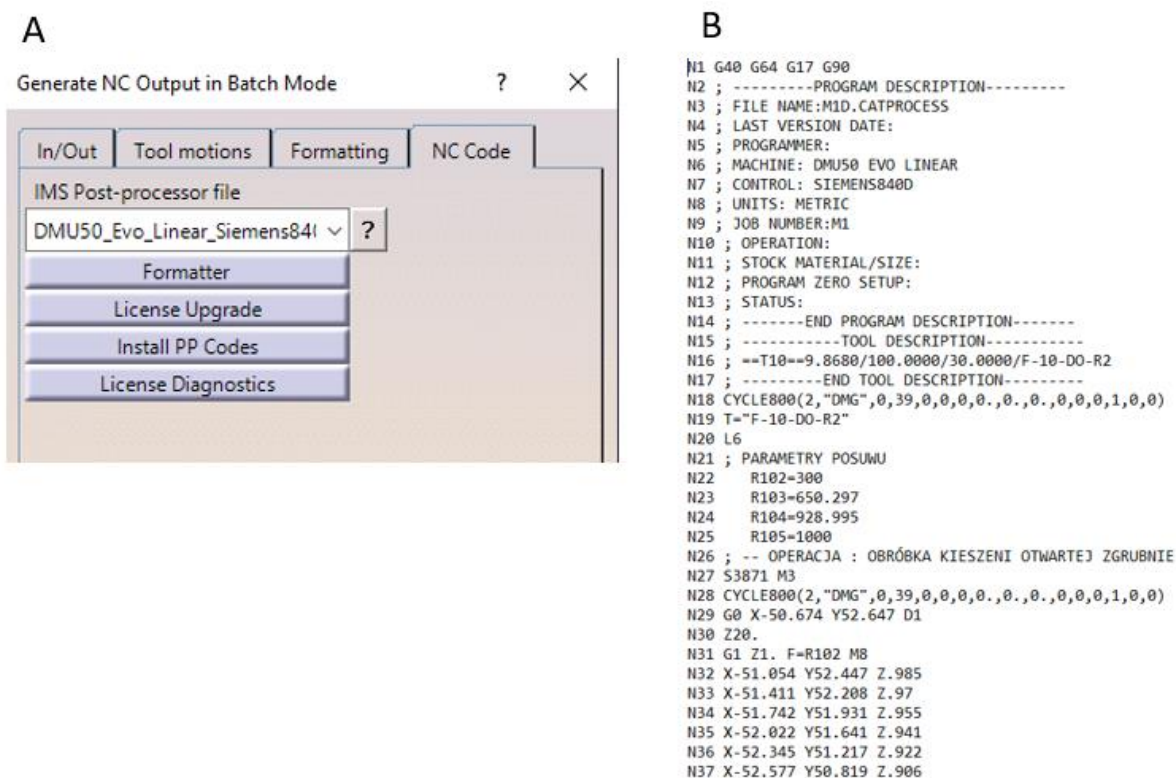


*Rys. 8.13 „Wejście” narzędzia w obrabianą część z szybkim posuwem*

Czas przygotowania programu obróbki z zastosowaniem metodyki ACPUT dla pierwszej części rodziny wyniósł ok. 224 [min], przy czym uwzględniono tutaj również czas przygotowania szablonu obróbkowego. Średni czas przygotowania programu obróbki dla pozostałych części rodziny wyniósł ok. 13,6 [min]. Szczegółowe wyniki uzyskanych czasów zostały przedstawione w rozdziale 8.2.3.

### **Etap 6 – export programów obróbki na obrabiarkę CNC**

Ostatnim etapem było przygotowanie programów NC na obrabiarkę DMU50. Wykorzystano do tego postprocesor DMU50 Siemens 840D stworzony przy użyciu oprogramowania IMS (rys. 8.14). Średni czas generowania programów obróbki wynosił 47 [s].



Rys. 8.14 Wybór postprocesora (A) oraz fragment kodu programu obróbki dla jednego z wariantów części rodziny OS 1 w ostatecznej postaci (B)

### 8.2.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 1 przez programistów

Zgodnie z założeniami opisanymi na początku rozdziału programy obróbki poszczególnych części z rodziny OS1 zostały utworzone przez programistów o różnych kwalifikacjach – początkujący i doświadczeni. Dysponowali oni kartą technologiczną przygotowaną przez technologa i używaną również w metodyce ACPUT. Programowanie odbywało się w systemie CATIA w trybie konwersacyjnym. Dziennie programiści przygotowywali kilka lub kilkanaście programów obróbki w zależności od stopnia ich złożoności.

### 8.2.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego

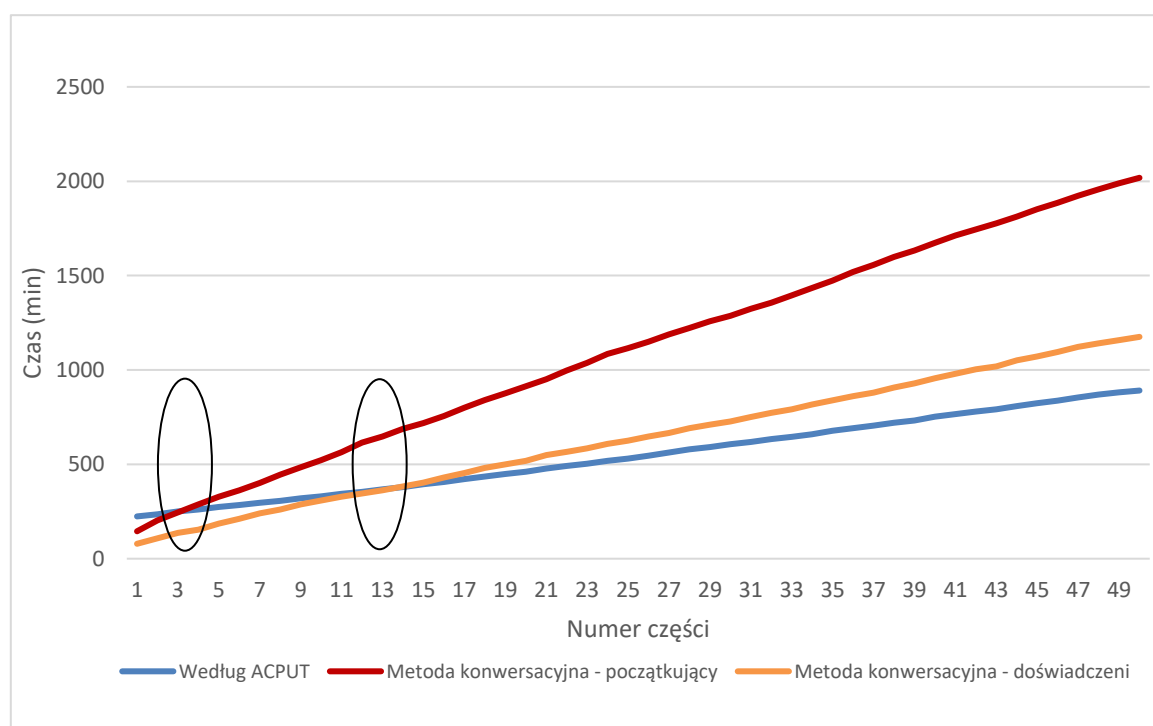
Programy obróbki utworzone przez programistów oraz z zastosowaniem metodyki ACPUT nie różniły się znacząco co do struktury programu (wszyscy dysponowali identyczną kartą technologiczną). Różnice pomiędzy programami (metodyka ACPUT/doświadczeni programiści/początkujący programiści) dotyczyły głównie wykorzystania różnych funkcji programu CAM oraz ustawień poszczególnych zabiegów.

Czasy przygotowania programów obróbki przedstawiono w tabeli 8.2. oraz na rysunkach 8.15 oraz 8.16.

Tabela 8.2 Porównanie czasów programowania obróbki dla rodziny części OS 1

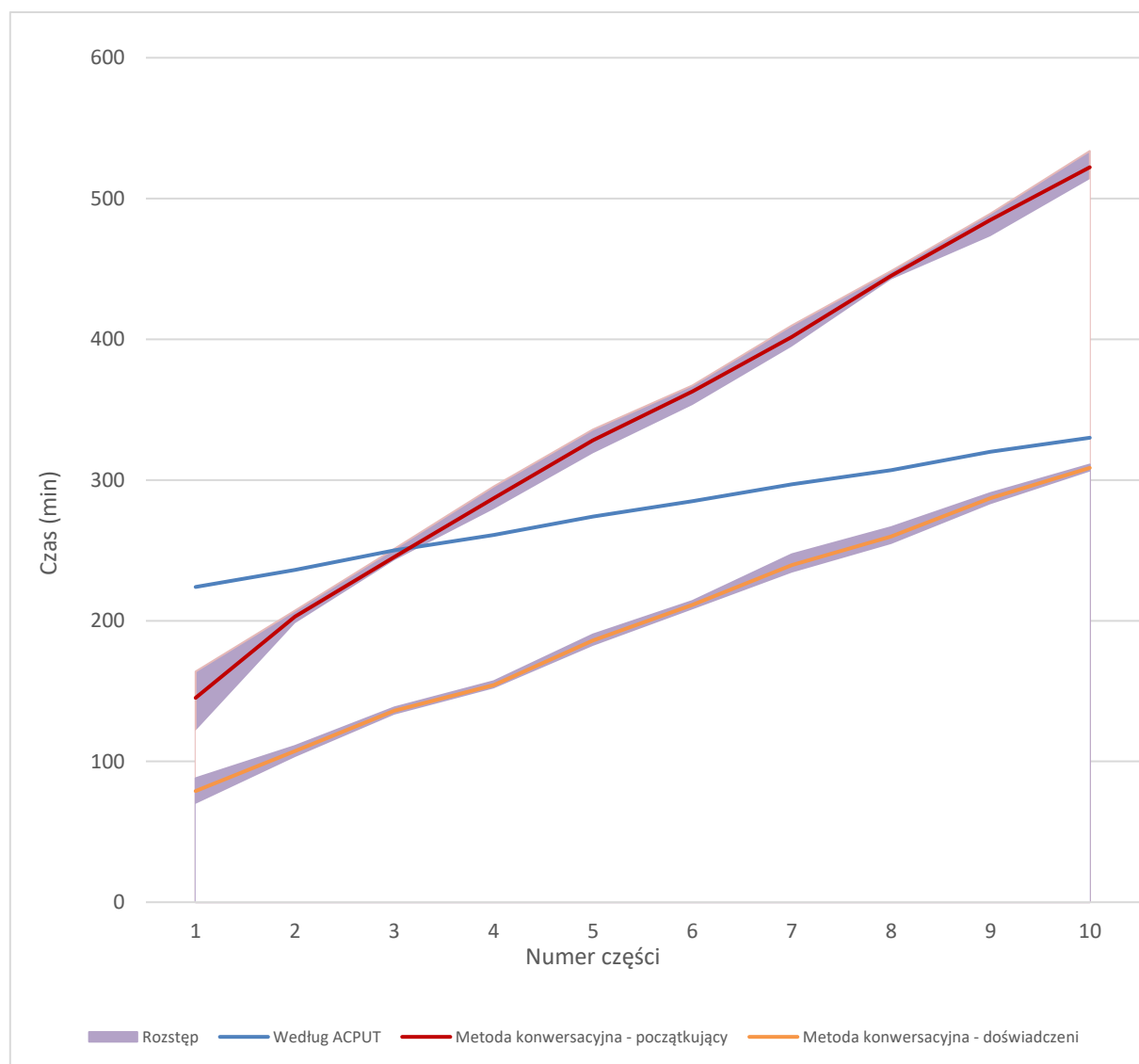
Część nr.	Czas przygotowania programu obróbki [min]					
	ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	224	224	145	145	79	79
2	12	236	58	203	28	107
3	14	250	42	245	29	136
4	11	261	42	287	18	154
5	13	274	41	328	32	186
6	11	285	35	363	25	211
7	12	297	39	402	28	240
8	10	307	44	445	20	260
9	13	320	40	485	27	287
10	10	330	37	522	22	309
...	...	...	...	...	...	...
20	11	460	38	914	18	519
30	14	606	29	1286	16	727
40	19	752	41	1673	26	955
<b>50</b>	10	<b>891</b>	30	<b>2018</b>	18	<b>1175</b>

Z rysunku 8.15 wynika, że w odniesieniu do rodziny części OS1 metodyka ACPUT jest wydajniejszą metodą programowania w porównaniu z programowaniem konwersacyjnym już przy 4-tej części rodziny, w przypadku programowania przez mniej doświadczonego programistę oraz 15-tej części, gdy programista ma duże doświadczenie.



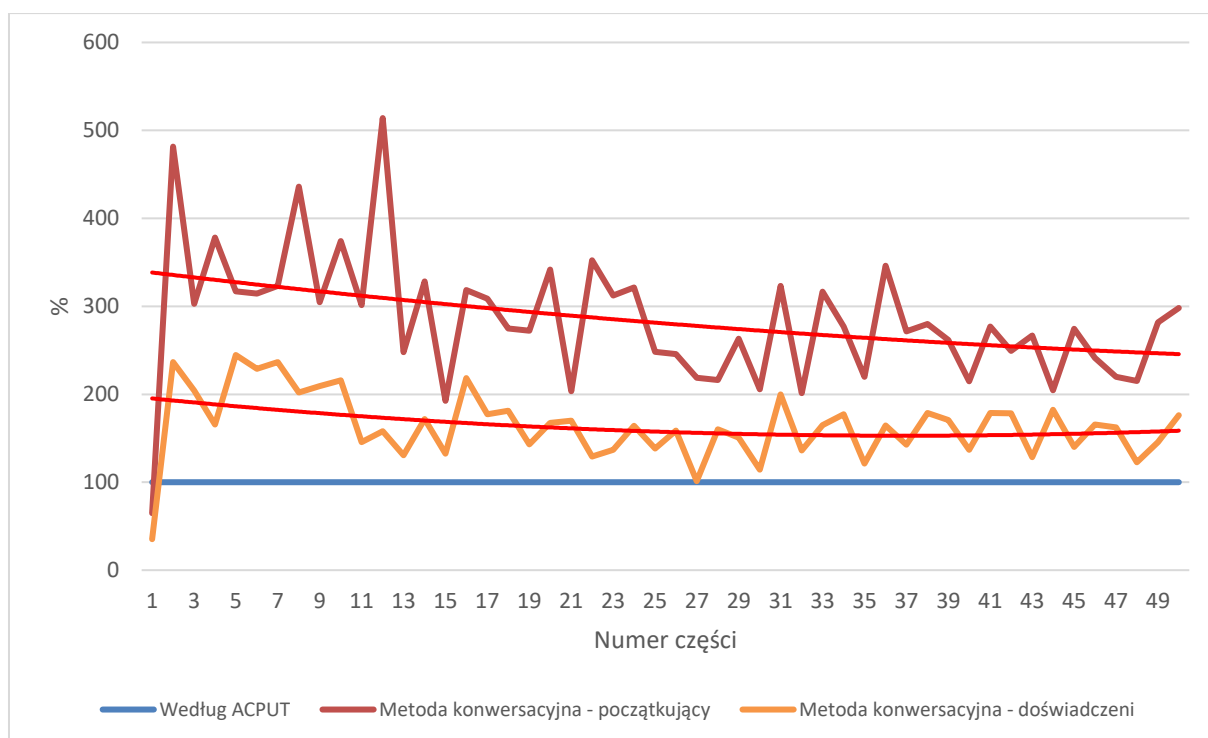
Rys. 8.15 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Na rysunku 8.16 zaznaczono różnice czasu programowania 10-ciu pierwszych części z rodziny OS1. W przypadku części nr 1 różnica między początkującymi programistami wyniosła 42 min, natomiast dla kolejnych części rodziny nie przekraczała 20 min. Wśród programistów doświadczonych różnice te wynosiły odpowiednio 18 min oraz 21 min.



Rys. 8.16 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych (dla pierwszych 10 części z rodziny OS1)

Porównanie czasów przygotowania programów obróbki kolejnych części rodziny OS1 przez programistów początkujących oraz doświadczonych przedstawiono na rysunku 8.17. Czasy odniesiono do czasów programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT, przyjmując je jako 100%.



*Rys. 8.17 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS1 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT*

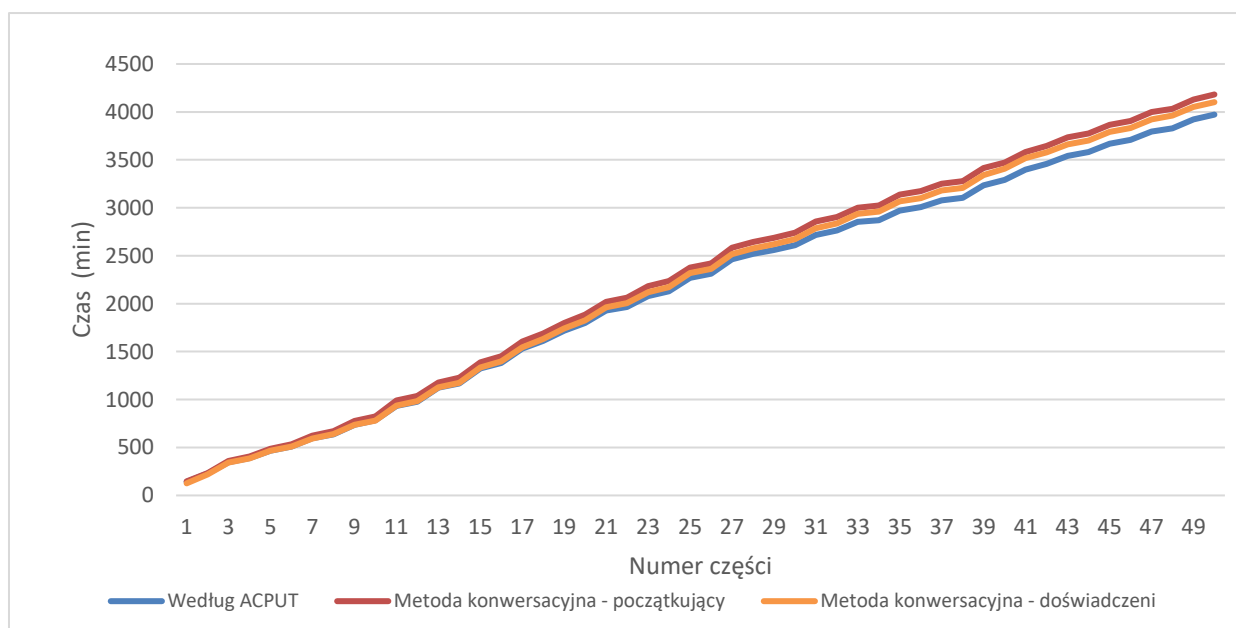
Automatyczne programowanie obróbki według ACPUT wymaga stworzenia szablonu, którego czas przygotowania został dodany do czasu programowania pierwszej części. Z tego powodu czas programowania pierwszej części rodziny z zastosowaniem metodyki ACPUT jest dłuższy niż czas programowania zarówno przez początkującego jak i doświadczonego programistę. Dla kolejnych części rodziny czasy programowania z zastosowaniem ACPUT są wyraźnie krótsze. Różnice między czasem programowania doświadczonego i początkującego programisty są związane z ich różną biegłością w posługiwaniu się programem CAM jednak w przypadku rodziny OS1 jak widać na rysunku 8.17 zmniejszają się wraz z liczbą przygotowanych programów obróbki (następuje proces uczenia w obu grupach, natomiast w grupie programistów początkujących jest on szybszy).

Zestawienie czasów obróbki poszczególnych części (na podstawie wyników symulacji), przedstawiono w tabeli 8.3 oraz zilustrowano na rysunkach 8.18 oraz 8.19. Różnice w czasach obróbki poszczególnych części są nieznaczne. Wynika to z tego, że parametry i sposób obróbki zostały określone w technologicznej bazie wiedzy, a każdy z programistów operował tymi samymi danymi, Różnica czasu obróbki według programu przygotowanego z zastosowaniem metodyki ACPUT oraz programów przygotowanych przez doświadczonych programistów

wyniosła 3,3%. W przypadku programistów początkujących wyniosła 5,3%. Wynikało to głównie z doboru innych prędkości oraz toru ruchu narzędzia podczas jego ruchów pomocniczych związanych z przemieszczaniem narzędzia do pozycji pracy i jego wycofywaniem oraz różnej drogi pokonywanej przez narzędzie podczas tych ruchów. Różnice w długości drogi wynikały z różnie przyjętych przez programistów elementów pomocniczych - płaszczyzn bezpieczeństwa, punktów startu narzędzia itp. Należy w tym miejscu podkreślić, że parametry te nie zostały określone w technologicznej bazie wiedzy.

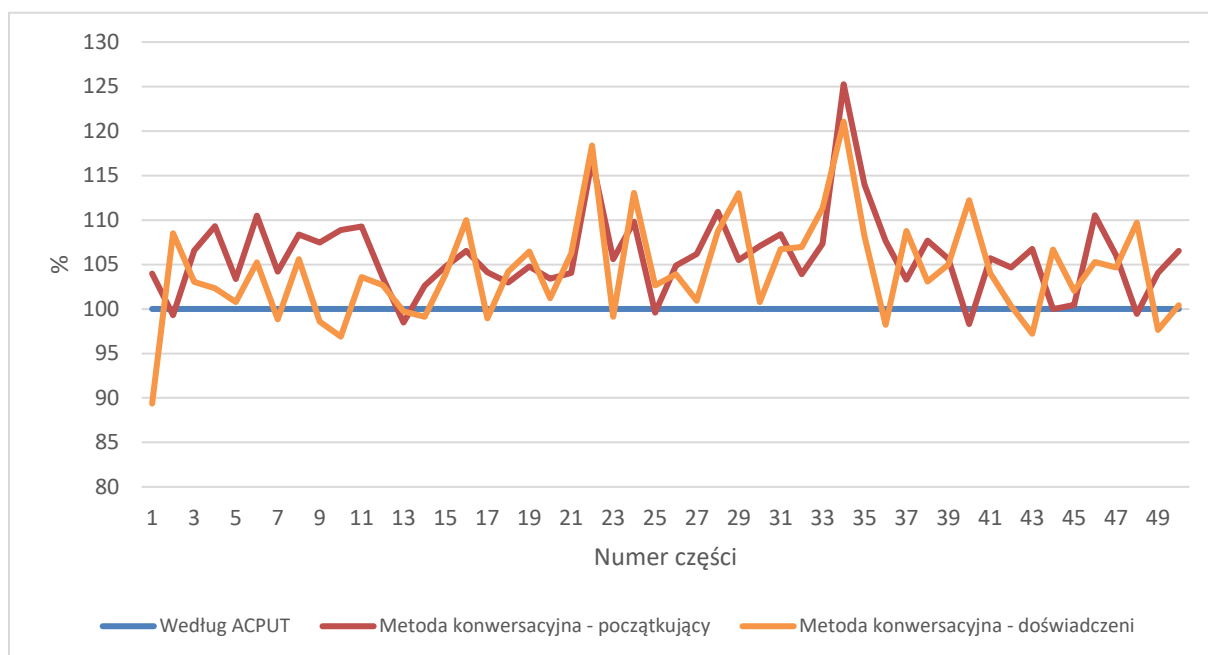
*Tabela 8.3 Porównanie czasów obróbki części rodziny dla OS 1 (na podstawie wyników symulacji)*

Część nr.	Czas obróbki [min]					
	ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	141	141	147	147	126	126
2	87	228	86	233	94	220
3	119	347	127	360	123	343
4	43	390	47	407	44	387
5	77	467	80	486	78	465
6	42	509	46	533	44	509
7	86	595	90	622	85	594
8	43	638	47	669	45	639
9	99	737	106	775	98	737
10	45	782	49	824	44	780
...	...	...	...	...	...	...
20	82	1800	85	1885	83	1826
30	51	2610	55	2740	51	2673
40	59	3292	58	3471	66	3408
<b>50</b>	<b>49</b>	<b>3972</b>	<b>52</b>	<b>4182</b>	<b>49</b>	<b>4102</b>



*Rys. 8.18 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)*

Porównanie czasów obróbki (wyrażone w procentach) pojedynczych części z zastosowaniem programów przygotowanych według metodyki ACPUT oraz przez programistów jest zaprezentowane na rys 8.19.



Rys. 8.19 Porównanie czasów obróbki poszczególnych części OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Skumulowany czas przygotowania programów obróbki oraz obróbki wszystkich 50 części w OS 1 wyniósł 4863 min w przypadku ACPUT, 6200 min w przypadku grupy programistów mniej doświadczonych (co stanowi 127,5% czasu procedury ACPUT) i 5277 min w przypadku programistów doświadczonych (co stanowi 108,5% czasu procedury ACPUT) – patrz tabela 8.4.

Tabela 8.4 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

	Całkowity czas przygotowania programów obróbki [min]	Całkowity czas obróbki [min]	Suma czasu przygotowania programów obróbki i obróbki [min]	Procent [%]
ACPUT	891	3972	4863	100
Programiści początkujący	2018	4182	6200	127,5
Programiści doświadczeni	1175	4102	5277	108,5

Koszt przygotowania pojedynczego programu obróbki ( $MP_c$ ) dla rodziny OS 1 w przypadku programowania konwersacyjnego wynosi:

$$MP_c = (\sum T_i / 60 \times P_r) / G_s,$$

gdzie:

$MP_c$  – koszt przygotowania pojedynczego programu obróbki,

$T_i$  – czas przygotowania pojedynczego programu dla rodziny części,

$G_s$  - liczebność rodziny,

$P_r$  - stawka wynagrodzenia programisty.

W przypadku metodyki ACPUT do zbudowania szablonu obróbkowego niezbędna jest wiedza doświadczonego programisty, natomiast do zaprogramowania obróbki kolejnych części wystarcza wiedza początkującego programisty. Zatem:

$$MP_c = [T_1 / 60 \times P_{re} + (\sum T_i - T_1) / 60 \times P_{rb}] / G_s,$$

gdzie:

$MP_c$  – koszt przygotowania pojedynczego programu obróbki,

$T_1$  – czas przygotowania pierwszego programu dla rodziny części,

$T_i$  – czas przygotowania pojedynczego programu dla pozostałych części rodziny,

$G_s$  - liczebność rodziny,

$P_{re}$  - stawka wynagrodzenia doświadczonego programisty.

$P_{rb}$  - stawka wynagrodzenia początkującego programisty.

Zakładając  $P_{re} = 80$  [EUR/h] oraz  $P_{rb} = 60$  [EUR/h] koszt programowania obróbki pojedynczej części wyniósł:

- programiści początkujący - 40 [EUR]
- programiści doświadczeni - 31 [EUR].
- ACPUT - 19 [EUR].



Tabela 8.5 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego ( $MP_c$ ) wg trzech metod

	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ – wzór	Koszt roboczogodziny $Pr$ [EUR]	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	$MP_c = [T_1/60 \times Pr_e + (T_r - T_1)/60 \times Pr_b] / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h, $Pr_b$ 60EUR/h	19	100
Programiści początkujący	$MP_c = (T_r/60 \times Pr_b) / G_s$	$Pr_b$ 60EUR/h	40	211
Programiści doświadczeni	$MP_c = (T_r/60 \times Pr_e) / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h	31	163

Koszt wytworzenia części  $C_m$ , składający się z kosztu przygotowania programów obróbki ( $MP_c$ ) oraz kosztu samej obróbki ( $MM_c$ ), wynosi:

$$C_m = MP_c + MM_c$$

gdzie:

$C_m$  – koszt wytworzenia części,

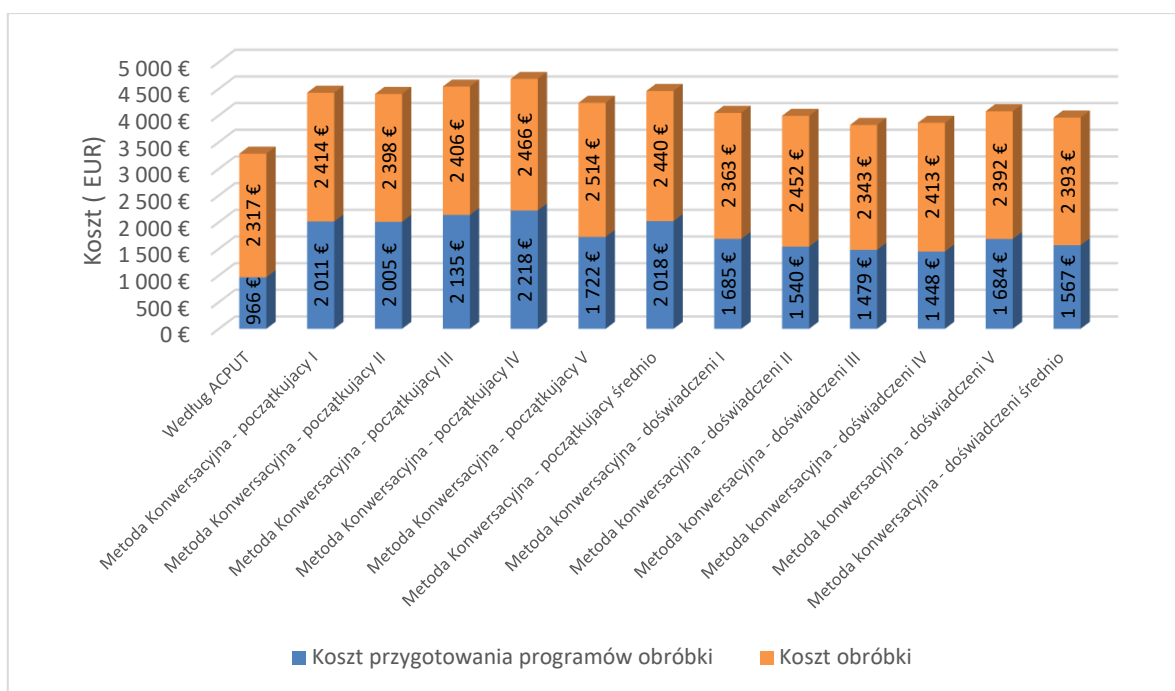
$MP_c$  – koszt przygotowania pojedynczego programu obróbki,

$MM_c$  – koszt obróbki części.

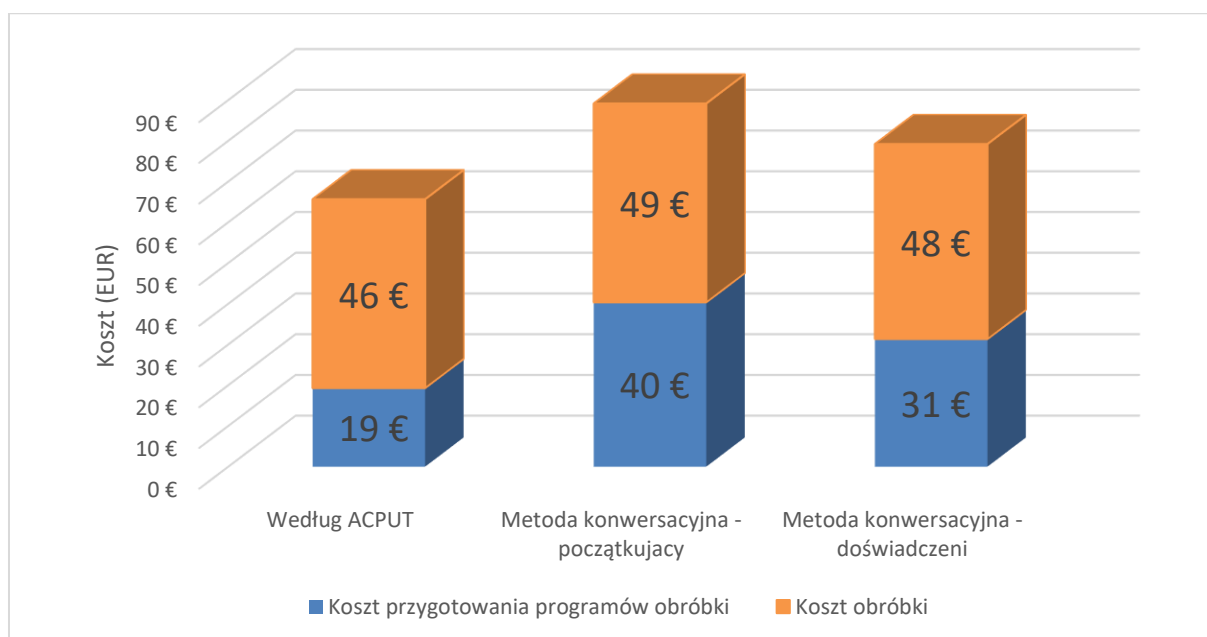
Na rys. 8.20 przedstawiono porównanie całkowitych kosztów wytwarzania rodziny części OS 1 (z rozbiem na poszczególnych programistów), natomiast w tabeli 8.6 oraz na rys. 8.21 porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części tej rodziny.

Tabela 8.6 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części ( $C_m$ ) wg trzech metod

	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Średni koszt obróbki pojedynczej części $MM_c$ [EUR]	Średni indywidualny koszt wytworzenia części $C_m$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	19	46	66	100
Programiści początkujący	40	49	89	135
Programiści doświadczeni	31	48	79	120



Rys. 8.20 Wykres kosztów wytwarzania rodziny OS 1



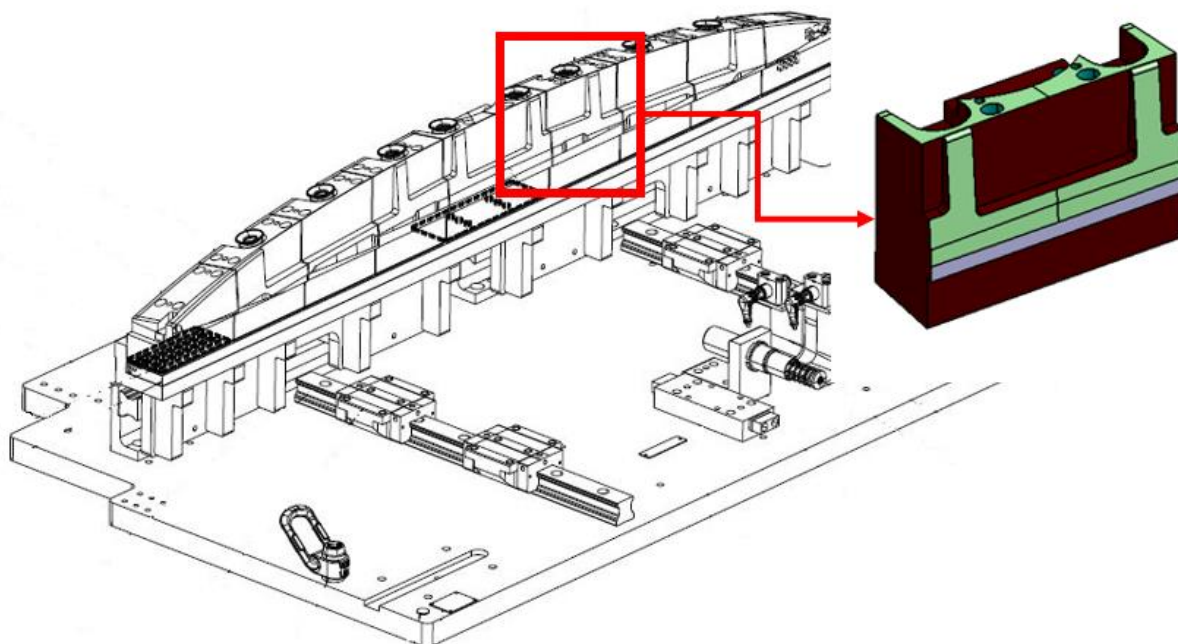
Rys. 8.21 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 1

## 8.3 Programowanie obróbki części pozycjonujących oprzyrządowania spawalniczego do spawania laserowego

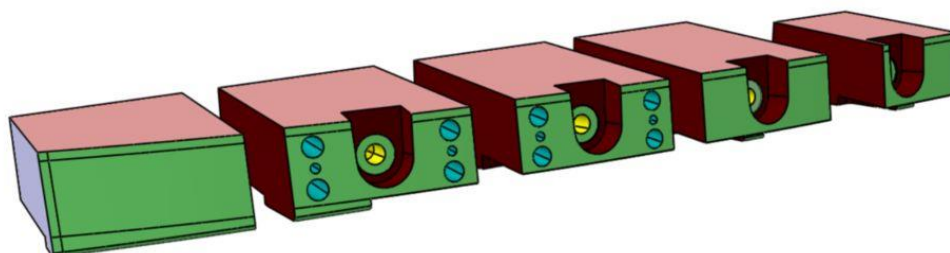
### 8.3.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS 2

Rodzina OS 2 to części oprzyrządowania spawalniczego (rys. 8.22, rys. 8.23), służącego do laserowego spawania elementów karoserii samochodu. Rodzina oprzyrządowania składa się

z 10 części. Dokumentacja ma postać modeli 3D części zapisanych w natywnym formacie systemu CATIA „CATPart”.



*Rys. 8.22 Widok modelu oprzyrządowania spawalniczego OS 2*

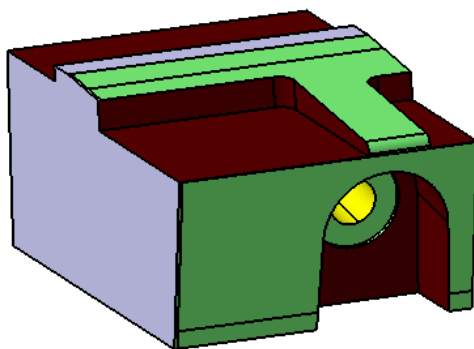


*Rys. 8.23 Widok modeli 3D części rodziny OS 2*

### **8.3.2 Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 2 z zastosowaniem metodyki ACPUT**

#### **Etap 1 – analiza modeli 3d rodziny części oprzyrządowania specjalnego, wytypowanie reprezentanta rodziny**

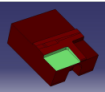
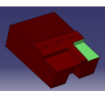
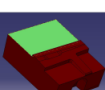

Zgodnie z metodyką ACPUT na początku dokonano wyboru reprezentanta rodziny. Dokonano przeglądu wszystkich części rodziny po kątem oceny stopnia podobieństwa cech geometrycznych i podobnie jak w oprzyrządowaniu OS1 na reprezentanta rodziny wybrano jedną z części posiadającą wszystkie cechy geometryczne obecne w innych częściach rodziny (rys. 8.24).



Rys. 8.24 Reprezentant rodziny OS 2

## Etap 2 – przygotowanie karty technologicznej

Karta technologiczna utworzona dla reprezentanta rodziny OS2 przedstawiona została na rysunku 8.25. W skład tej karty technologicznej wchodzi jedna (1) operacja oraz (10) zabiegów. Zabiegi te to między innymi obróbka kieszeni, obróbka otworów oraz obróbka zgrubna i wykańczająca powierzchni.

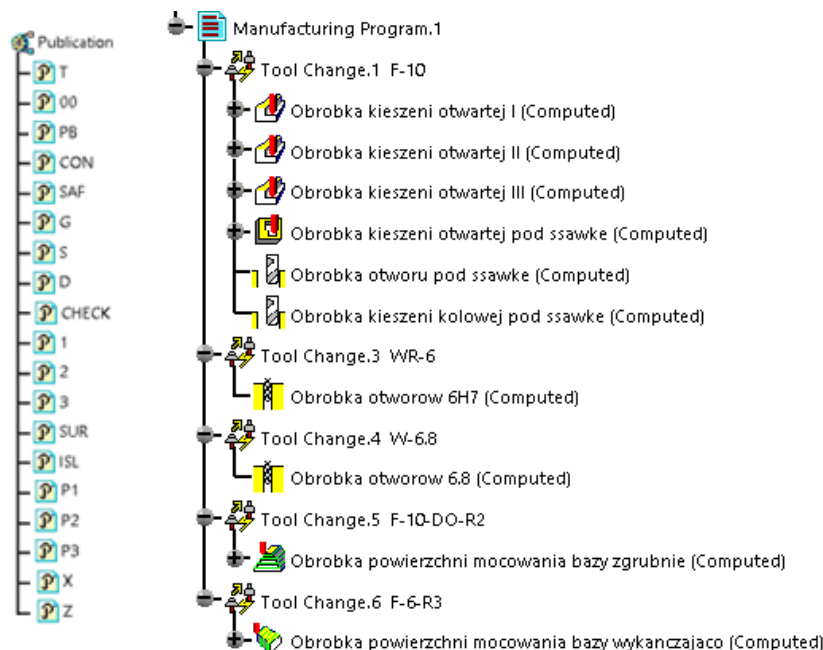
Nazwa karty technologicznej		Karta technologiczna W&W		Data	2021-08-10 r.							
Opis		Bazy ustalające elementy spawane laserowo										
Nazwa rodziny części		W&W Laser form		Liczebność	10							
Opis rodziny		Materiał: WCL Firma W&W		Obrabiarka	Doosan DNM 6700							
Nazwa operacji		W&W Laser form OP#1		Oznaczenie operacji	OP#1							
		Parametry zabiegów										
Nazwa zabiegu	Rodzaj obróbki	Typ zabiegu	Narzędzie	Głębokość skrawania [mm]	Głębokość obróbki otworu [mm]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość skrawania [m/min]	Prędkość posuwu [mm/obr]/[mm/ząb]	Sposób poruszania się narzędzia	Kierunek ruchu narzędzia	Geometria obróbki
Obróbka kieszeni otwartej I W&W	Frezowanie	Obróbka po konturze	F-10	15	n/a	2	2	140	0,08	W jedną stronę	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni otwartej II W&W	Frezowanie	Obróbka po konturze	F-10	15	n/a	2	2	140	0,08	W jedną stronę	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni otwartej III W&W	Frezowanie	Obróbka po konturze	F-10	15	n/a	2	2	140	0,08	W jedną stronę	Przeciwbieżny	
Obróbka kieszeni otwartej pod ssawkę W&W	Frezowanie	Obróbka kieszeni	F-10	15	n/a	2	2	140	0,08	Koncentryczny	Przeciwbieżny	

Rys. 8.25 Karta technologiczna rodziny OS 2

## Etap 3, Etap 4 – przygotowanie modeli CAD oraz szablonu obróbki

Podobnie jak w przypadku oprzyrządowania OS1 dokonano modyfikacji modeli 3D tworząc „publikacje”. Listę utworzonych metadanych, dodanych do struktury wybranych

modeli CAD z OS 2 oraz szablon obróbki utworzony zgodnie z kartą technologiczną został przedstawiony na rys. 8.26.



Rys. 8.26 Metadane oraz struktura szablonu obróbki rodziny OS 2

### **Etap 5, Etap 6 – przygotowanie programów obróbki oraz export programów obróbki na obrabiarkę CNC**

Szablon obróbki umożliwił automatyczne stworzenie programów obróbki dla poszczególnych części z rodziny. Po wyborze wariantu części program CAM automatycznie wyszukiwał geometrię przedmiotu obrabianego, półfabrykatu, a także ustawiał punkt zerowy przedmiotu obrabianego i rozpoznawał niezbędne powierzchnie, kontury i punkty. Zabiegi, dla których program nie znajdował odpowiednich elementów geometrycznych zostawały automatycznie wyłączone. Po wykonaniu przeliczenia trajektorii ruchu narzędzi wykonano symulację programów. W przypadku oprzyrządowania OS2 nie wykryto błędnie wygenerowanych programów.

Czas przygotowania programu obróbki dla pierwszej części wyniósł ok. 66 [min], przy czym uwzględniono tutaj również czas przygotowania szablonu obróbkowego. Średni czas przygotowania programu obróbki dla pozostałych części wyniósł ok. 14,1 [min]. Szczegółowe wyniki uzyskanych czasów zostały przedstawione w rozdziale 8.3.4.

Ostatnim etapem było przygotowanie programów NC na obrabiarkę Mikron VCE 800 PRO. Wykorzystano do tego postprocesor Heidenhein iTNC530 stworzony przy użyciu oprogramowania IMS. Średni czas generowania programów obróbki wynosił 28 [s].

### 8.3.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 2 przez programistów

Programy obróbki poszczególnych części z rodziny OS2 zostały utworzone przez programistów początkujących i doświadczonych w oparciu o kartę technologiczną przygotowaną przez technologa i używaną również w metodyce ACPUT. Programowanie odbywało się w systemie CATIA w trybie konwersacyjnym. Programy przygotowane zostały przez doświadczonych programistów w ciągu jednego dnia natomiast przez początkujących w ciągu dwóch dni.

### 8.3.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego

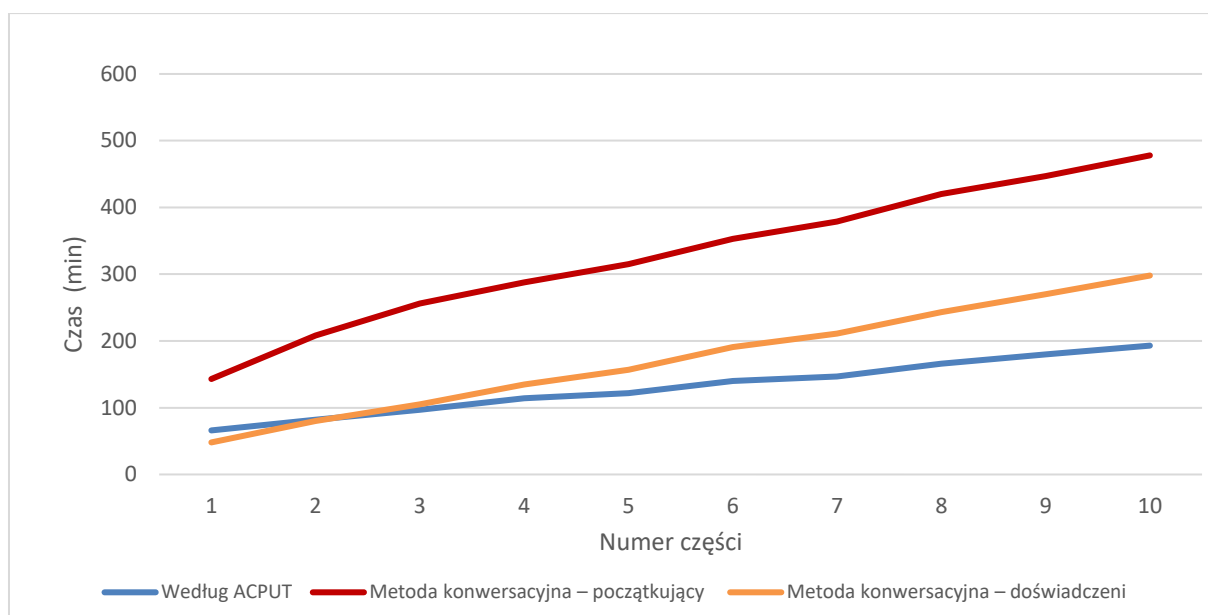
Porównanie czasów programowania obróbki dla oprzyrządowania OS2 zostało zrealizowane analogicznie jak w przypadku oprzyrządowania OS1.

Czasy przygotowania programów obróbki przedstawiono w tabeli 8.7 oraz na rysunkach 8.27 i 8.28.

*Tabela 8.7 Porównanie czasów programowania obróbki dla rodziny części OS 2*

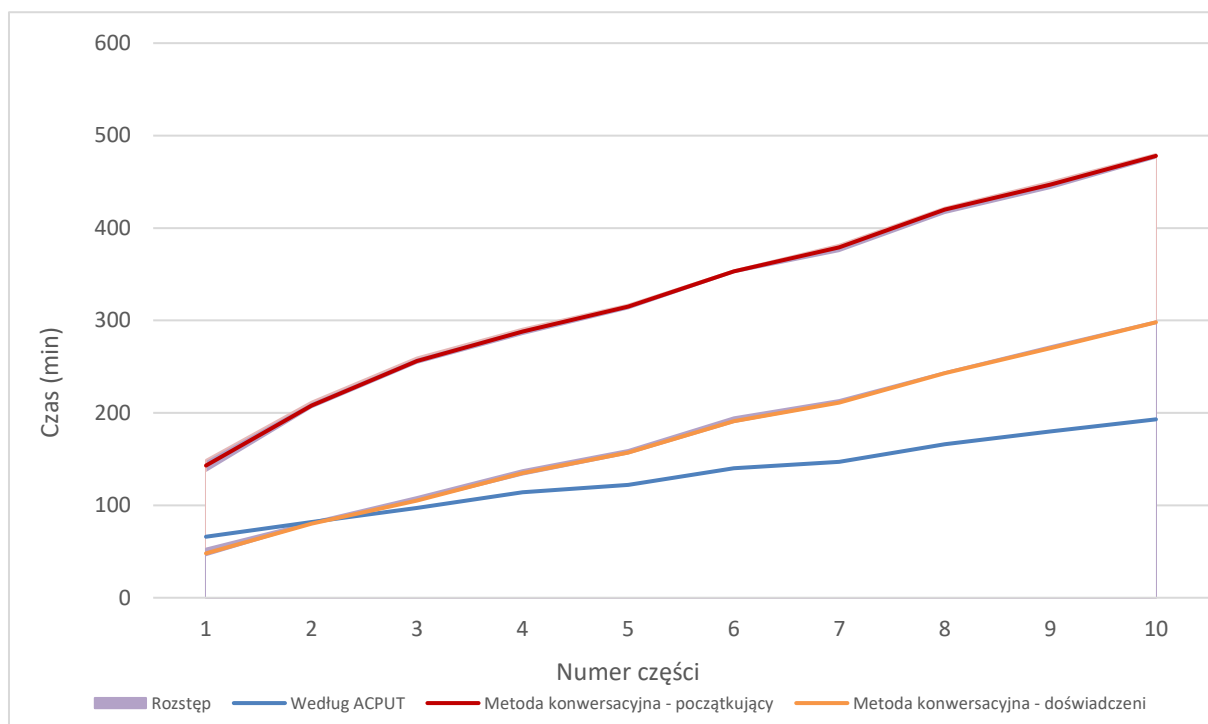
Część nr.	Czas przygotowania programu obróbki [min]					
	Według ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	66	66	143	143	48	48
2	16	82	65	208	32	80
3	15	97	48	256	25	105
4	17	114	32	288	30	135
5	8	122	27	315	22	157
6	18	140	38	353	34	191
7	7	147	26	379	20	211
8	19	166	41	420	32	243
9	14	180	27	447	27	270
10	13	<b>193</b>	31	<b>478</b>	28	<b>298</b>

Z rysunku 8.27 wynika, że w odniesieniu do rodziny części OS 2 metodyka ACPUT jest wydajniejszą metodą programowania w porównaniu z programowaniem konwersacyjnym już przy 1-ej części rodziny, w przypadku programowania przez mniej doświadczonego programistę oraz 3-ej części, gdy programista ma duże doświadczenie.



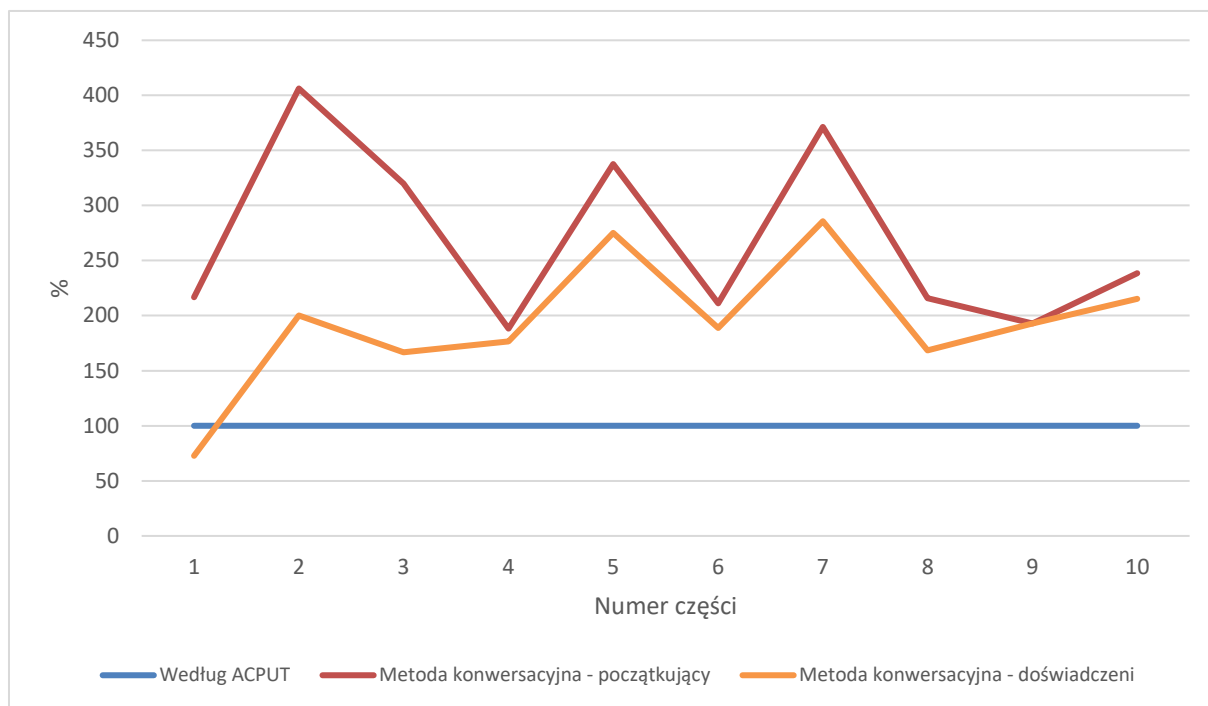
Rys. 8.27 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Na rysunku 8.28 zaznaczono różnice czasu programowania części z rodziny OS2. W przypadku części nr 1 różnica między początkującymi programistami wyniosła 13 [min], natomiast dla kolejnych części rodziny nie przekraczała 8 [min]. Wśród programistów doświadczonych różnice te wynosiły odpowiednio 8 [min] oraz 6 [min].



Rys. 8.28 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych dla części z rodziny OS2

Porównanie czasów przygotowania programów obróbki kolejnych części rodziny OS2 przez programistów początkujących oraz doświadczonych przedstawiono na rysunku 8.29. Czasy odniesiono do czasów programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT, przyjmując je jako 100%.



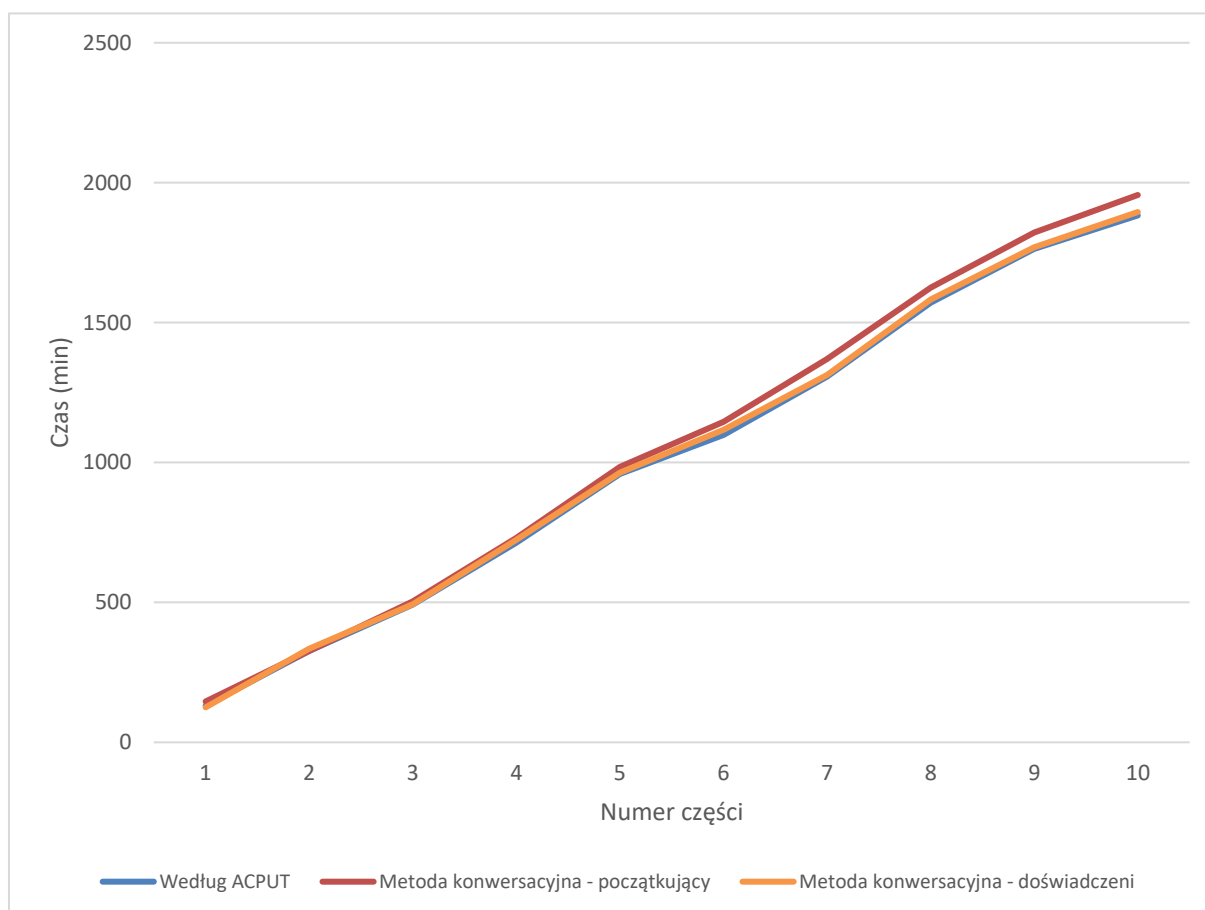
*Rys. 8.29 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS2 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT*

Zestawienie czasów obróbki poszczególnych części (na podstawie wyników symulacji), przedstawiono w tabeli 8.8 oraz zilustrowano na rysunkach. 8.30 oraz 8.31. Podobnie jak w przypadku OS1 różnice w czasach obróbki poszczególnych części są nieznaczne. Różnica czasu obróbki według programu przygotowanego z zastosowaniem metodyki ACPUT oraz programów przygotowanych przez doświadczonych programistów wyniosła 0,6%. W przypadku programistów początkujących wyniosła 3,9%.



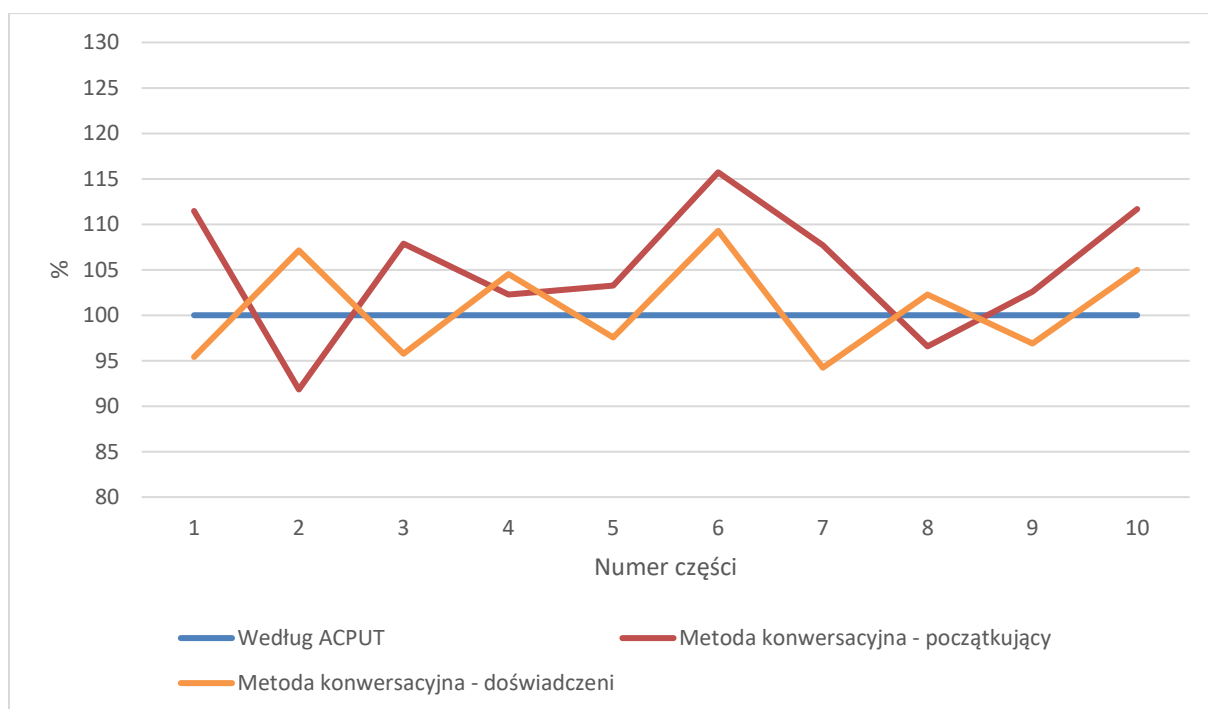
Tabela 8.8 Porównanie czasów obróbki części rodziny dla OS 2 (na podstawie wyników symulacji)

Część nr.	Czas obróbki [min]					
	Według ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	131	131	146	146	125	125
2	196	327	180	326	210	335
3	165	492	178	504	158	493
4	221	713	226	730	231	724
5	246	959	254	984	240	964
6	140	1099	162	1146	153	1117
7	208	1307	224	1370	196	1313
8	264	1571	255	1625	270	1583
9	192	1763	197	1822	186	1769
10	120	<b>1883</b>	134	<b>1956</b>	126	<b>1895</b>



Rys. 8.30 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Porównanie czasów obróbki (wyrażone w procentach) pojedynczych części z zastosowaniem programów przygotowanych według metodyki ACPUT oraz przez programistów jest zaprezentowane na rys 8.31.



*Rys. 8.31 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)*

Skumulowany czas przygotowania programów obróbki oraz obróbki 10 części OS 2 wyniósł 2076 [min] w przypadku ACPUT, 2434 [min] w przypadku grupy programistów początkujących (co stanowi 117,2% czasu procedury ACPUT) i 2193 [min] w przypadku programistów doświadczonych (co stanowi 105,6% czasu procedury ACPUT) – patrz tabela 8.9.

*Tabela 8.9 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)*

	Całkowity czas przygotowania programów obróbki [min]	Całkowity czas obróbki [min]	Suma czasu przygotowania programów obróbki i obróbki [min]	Procent [%]
ACPUT	193	1883	2076	100
Programiści początkujący	478	1956	2434	117,2
Programiści doświadczeni	298	1895	2193	105,6

Zakładając  $P_{re} = 80$  [EUR/h] oraz  $P_{rb} = 60$  [EUR/h] koszt programowania obróbki pojedynczej części wyniósł:

- programiści początkujący - 48 [EUR],
- programiści doświadczeni - 40 [EUR],
- ACPUT – 21,5 [EUR].

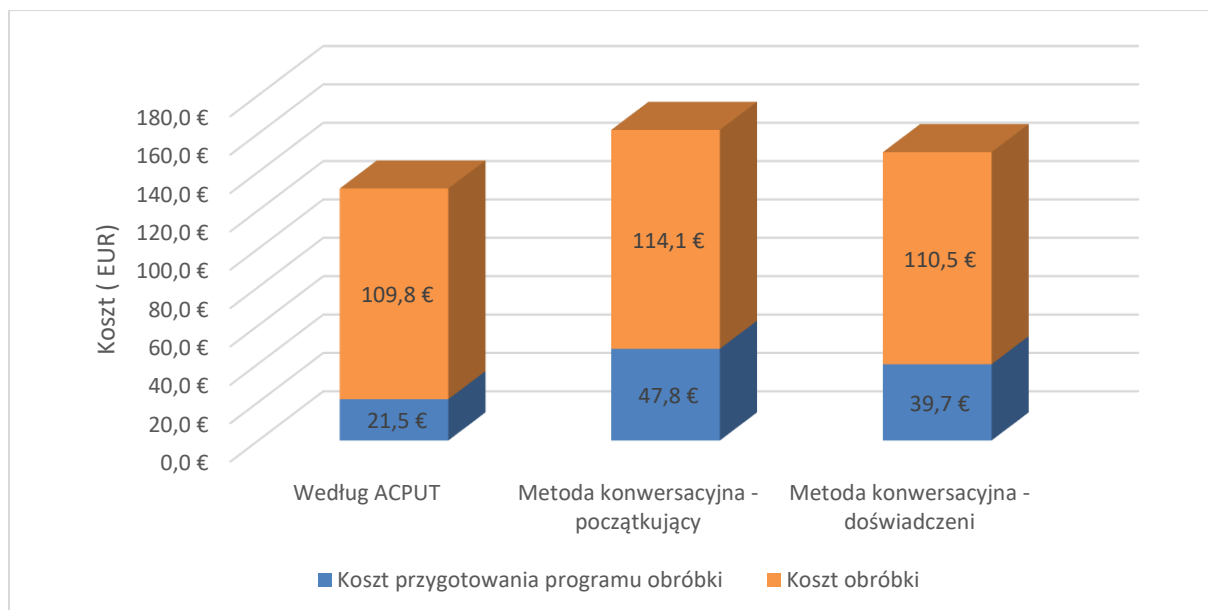
*Tabela 8.10 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego ( $MP_c$ ) wg trzech metod*

	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ – wzór	Koszt roboczogodziny $Pr$ [EUR]	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	$MP_c = [T_1/60 \times Pr_e + (T_r - T_1)/60 \times Pr_b] / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h, $Pr_b$ 60EUR/h	21,5	100
Programiści początkujący	$MP_c = (T_i/60 \times Pr_b) / G_s$	$Pr_b$ 60EUR/h	48	222
Programiści doświadczeni	$MP_c = (T_i/60 \times Pr_e) / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h	40	186

W tabeli 8.11 oraz na rys. 8.32 przedstawiono porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części rodziny OS2.

*Tabela 8.11 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części ( $C_m$ ) wg trzech metod*

	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Średni koszt obróbki pojedynczej części $Mm_c$ [EUR]	Średni indywidualny koszt wytworzenia części $C_m$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	21,5	110	131,5	100
Programiści początkujący	48	114	162	123
Programiści doświadczeni	40	110,5	150,5	114

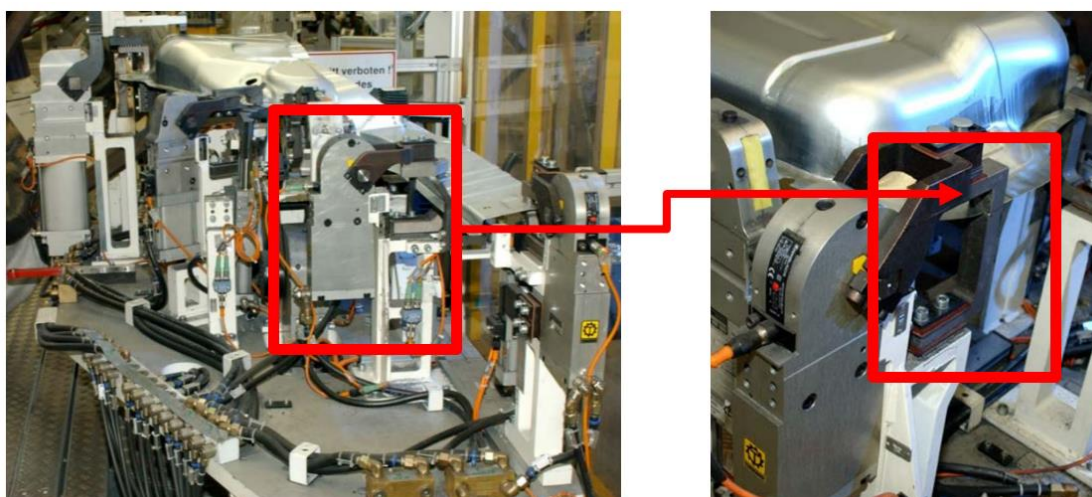


Rys. 8.32 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 2

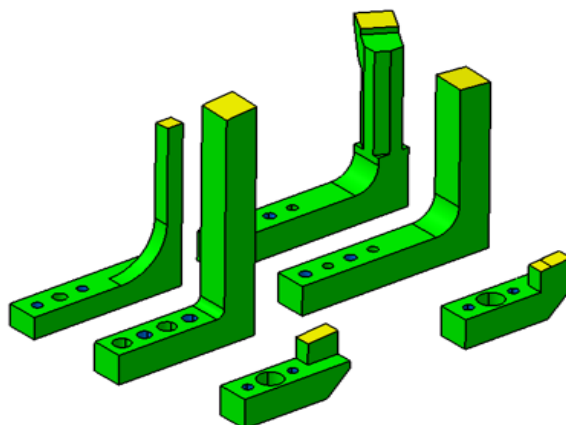
## 8.4 Programowanie obróbki części pozycjonujących oprzyrządowania spawalniczego do zgrzewania punktowego

### 8.4.1 Charakterystyka rodziny oprzyrządowania OS 3

Rodzina OS 3 to części oprzyrządowania spawalniczego (rys. 8.33, rys 8.34), stosowanego do zgrzewania elektrycznego oporowego elementów karoserii samochodu. Rodzina części składa się ze 100 części. Dokumentacja części ma postać modeli 3D zapisanych w uniwersalnym formacie „stp”.



Rys. 8.33 Widok rzeczywistego oprzyrządowania spawalniczego do zgrzewania punktowego

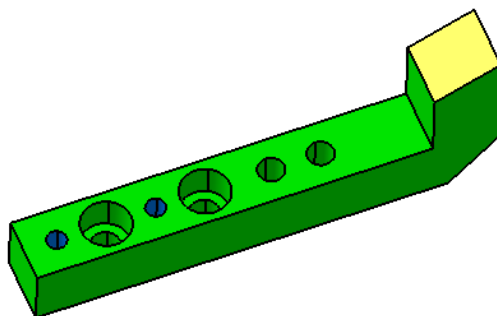


Rys. 8.34 Widok modeli 3D części rodziny OS 3

#### 8.4.2 Przygotowanie programów obróbki dla rodziny części OS 3 z zastosowaniem metodyki ACPUT

##### Etap 1 - analiza modeli 3d rodziny części oprzyrządowania specjalnego, wytypowanie reprezentanta rodziny

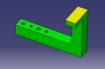

W przypadku rodziny części OS3 mimo jej wysokiej liczebności żaden z jej członków nie posiadał wszystkich cech geometrycznych obecnych w innych częściach. Z tego powodu nie można było skorzystać z gotowej części będącej członkiem rodziny i specjalnie przygotowana została część, będąca jej reprezentantem (rys. 8.35).



Rys. 8.35 Stworzony reprezentant rodziny OS 3

##### Etap 2 - przygotowanie karty technologicznej

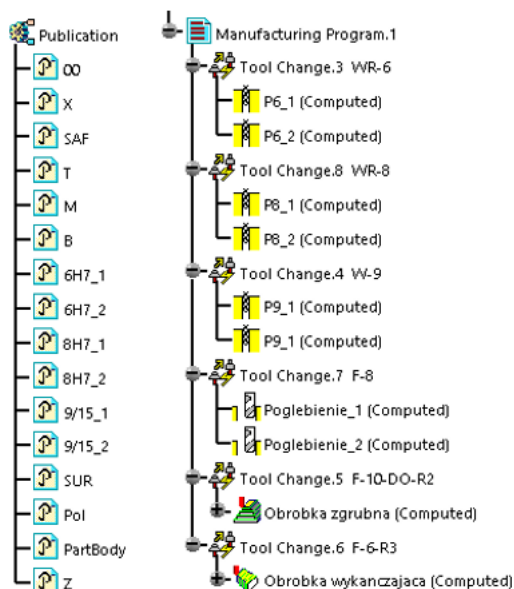
Karta technologiczna utworzona dla reprezentanta rodziny OS3 przedstawiona została na rysunku 8.36. W skład tej karty technologicznej wchodzi jedna (1) operacja oraz (10) zabiegów. Zabiegi te to wiercenie otworów, wykonanie pogłębień oraz obróbka zgrubna i wykańczająca powierzchni.

Nazwa karty technologicznej	Karta technologiczna Mikro		Data	2021-12-15 r.								
Opis	Podpory ustalające elementy zgrzewane											
Nazwa rodziny części	Mikro L Bracket		Liczebność	100								
Opis rodziny	Materiał: 38HMJ Firma: Mikro		Obrabiarka	Mikron VCE 800 Pro								
			Pracownik	Frezer								
Nazwa operacji	Mikro L Bracket OP#1		Oznaczenie operacji	OP#1								
	Parametry zabiegów											
Nazwa zabiegu	Rodzaj obróbki	Typ zabiegu	Narzędzie	Głębokość skrawania [mm]	Głębokość obróbki otworu [mm]	Dystans między przejściami [mm]	Szerokość skrawania [mm]	Prędkość skrawania [m/min]	Prędkość posuwu [mm/obr]/ [mm/ząb]	Sposób poruszania się narzędzia	Kierunek ruchu narzędzia	Geometria obróbki
Obróbka otworów 6H7 I Mikro	Wiercenie	Wiercenie	WR-6	n/a	22	n/a	n/a	40	0,1	Wiercenie	Prawe	
Obróbka otworów 6H7 II Mikro	Wiercenie	Wiercenie	WR-6	n/a	22	n/a	n/a	40	0,1	Wiercenie	Prawe	
Obróbka otworów 8H7 I Mikro	Wiercenie	Wiercenie	WR-8	n/a	22	n/a	n/a	40	0,1	Wiercenie	Prawe	
Obróbka otworów 8H7 II Mikro	Wiercenie	Wiercenie	WR-8	n/a	22	n/a	n/a	40	0,1	Wiercenie	Prawe	

Rys. 8.36 Karta technologiczna rodziny OS 3

### Etap 3, Etap 4 – przygotowanie modeli CAD oraz szablonu obróbki

Analogicznie jak w przypadku rodzin OS1 oraz OS2 dla tej rodziny dokonano modyfikacji modeli 3D tworząc „publikacje”. Listę utworzonych metadanych, dodanych do struktury wybranych modeli 3D z OS 3 prezentuje rysunek 8.37. Zgodnie z kartą technologiczną stworzony został poniżej przedstawiony szablon obróbki.



Rys. 8.37 Metadane oraz struktura szablonu obróbki rodziny OS 3

---

## **Etap 5, Etap 6 – przygotowanie programów obróbki oraz export programów obróbki na obrabiarkę CNC**

Analogicznie jak w poprzednich przykładach szablon obróbki umożliwił automatyczne stworzenie programów obróbkowych dla poszczególnych części z rodziny, po czym wykonano symulację programów. W przypadku oprzyrządowania OS3 nie wykryto błędnie wygenerowanych programów.

Czas przygotowania programu obróbki dla pierwszej części wyniósł ok. 30 [min], przy czym uwzględniono tutaj również czas przygotowania szablonu obróbki. Średni czas przygotowania programu obróbki dla pozostałych części wyniósł ok. 5,7 [min]. Szczegółowe wyniki uzyskanych czasów zostały przedstawione w rozdziale 8.4.3.

W przypadku części oprzyrządowania OS3 programy NC przygotowane zostały na obrabiarkę Mikron VCE 800 PRO. Wykorzystano do tego postprocesor Heidenhein iTNC530 stworzony przy użyciu oprogramowania IMS. Średni czas generowania programów obróbkowych wynosił 16 [s].

### **8.4.3. Programowanie programów obróbki dla rodziny części OS 3 przez programistów**

Również w przypadku rodziny OS3 programy obróbki poszczególnych części z rodziny zostały utworzone przez programistów początkujących i doświadczonych w oparciu o kartę technologiczną przygotowaną przez technologa i używaną również w metodyce ACPUT. Programowanie odbywało się w systemie CATIA w trybie konwersacyjnym. Programy przygotowane zostały przez programistów w ciągu jednego tygodnia.

### **8.4.4 Porównanie czasów programowania obróbki automatycznego i konwersacyjnego**

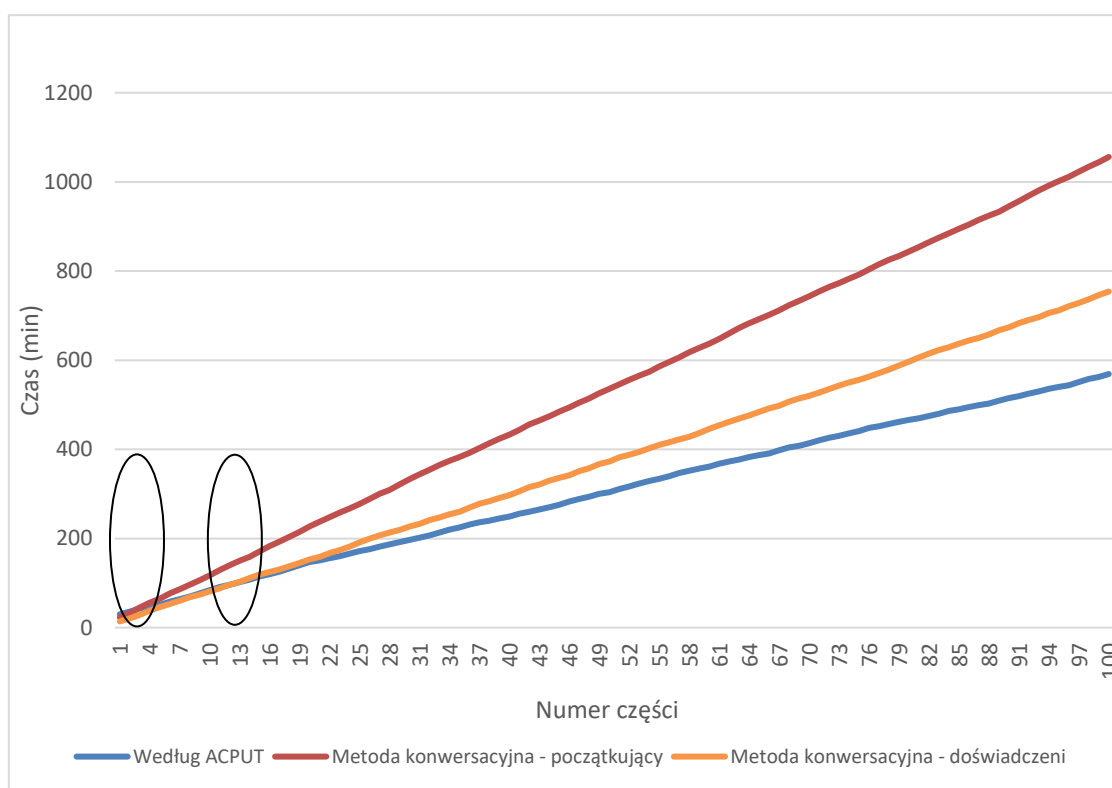
Porównanie czasów programowania obróbki dla oprzyrządowania OS3 zostało zrealizowane analogicznie jak w przypadku oprzyrządowania OS1 oraz OS2.

Czasy przygotowania programów obróbki przedstawiono w tabeli 8.12. oraz na rysunkach 8.38 oraz 8.39.

Tabela 8.12 Porównanie czasów przygotowania programów obróbki dla OS 3

Część nr.	Czas przygotowania programu obróbki [min]					
	Według ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	30	30	23	23	14,00	14
2	6	36	10	33	7,00	21
3	4	40	12	45	8,00	29
4	5	45	11	56	9,00	38
5	6	51	9	65	8,00	46
6	6	57	12	77	7,00	53
7	7	64	9	86	7,00	60
8	4	68	10	96	8,00	68
9	4	72	10	106	6,00	74
10	4	76	11	117	7,00	81
...	...	...	...	...	...	...
40	7	243	9	433	6	297
60	9	354	9	637	9	446
80	10	461	10	844	9	594
<b>100</b>	<b>12</b>	<b>569</b>	<b>12</b>	<b>1056</b>	<b>8</b>	<b>754</b>

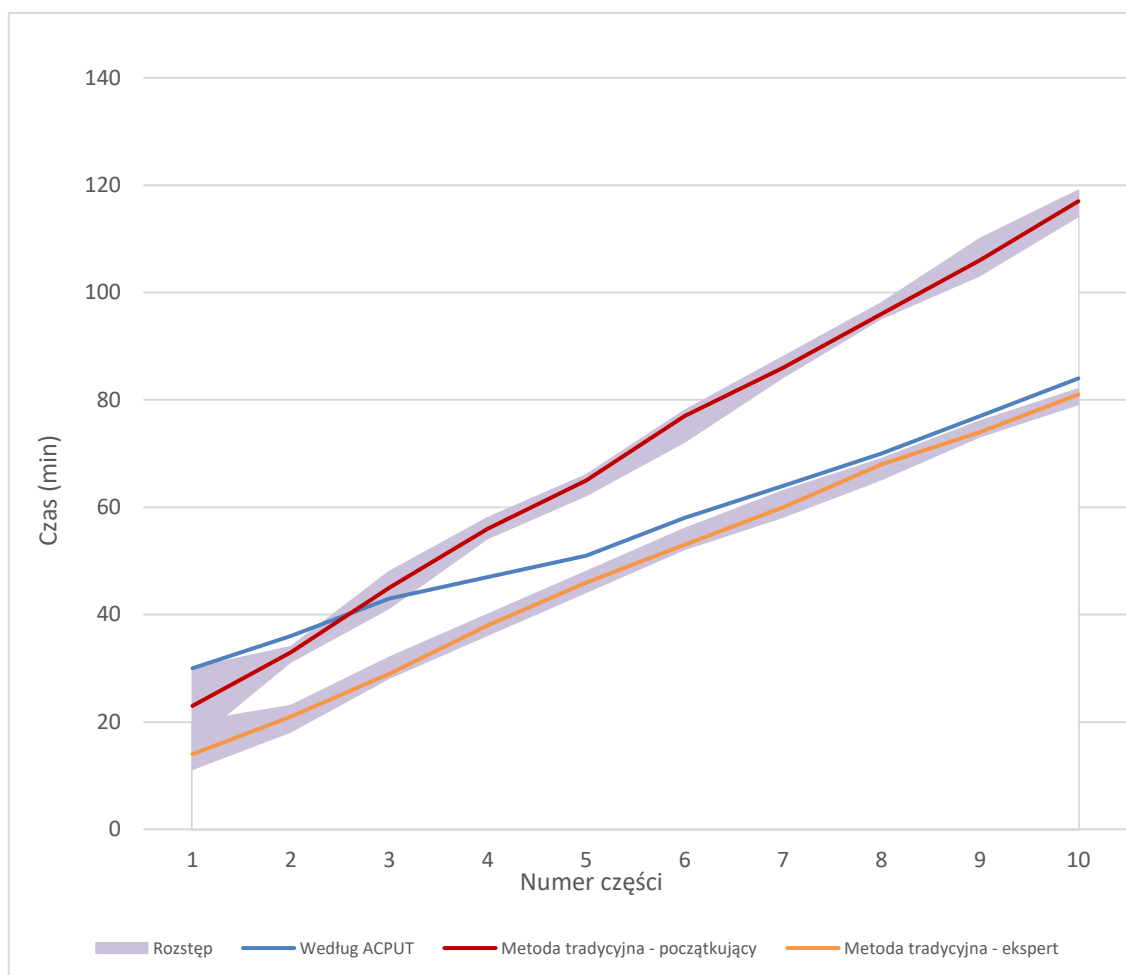
W przypadku rodziny OS3 metodyka ACPUT jest wydajniejszą metodą programowania już przy 3-iej części rodziny porównując do programowania konwersacyjnego przez początkującego programistę oraz przy 13-iej części w przypadku programisty doświadczonego (rys. 8.38).



Rys. 8.38 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

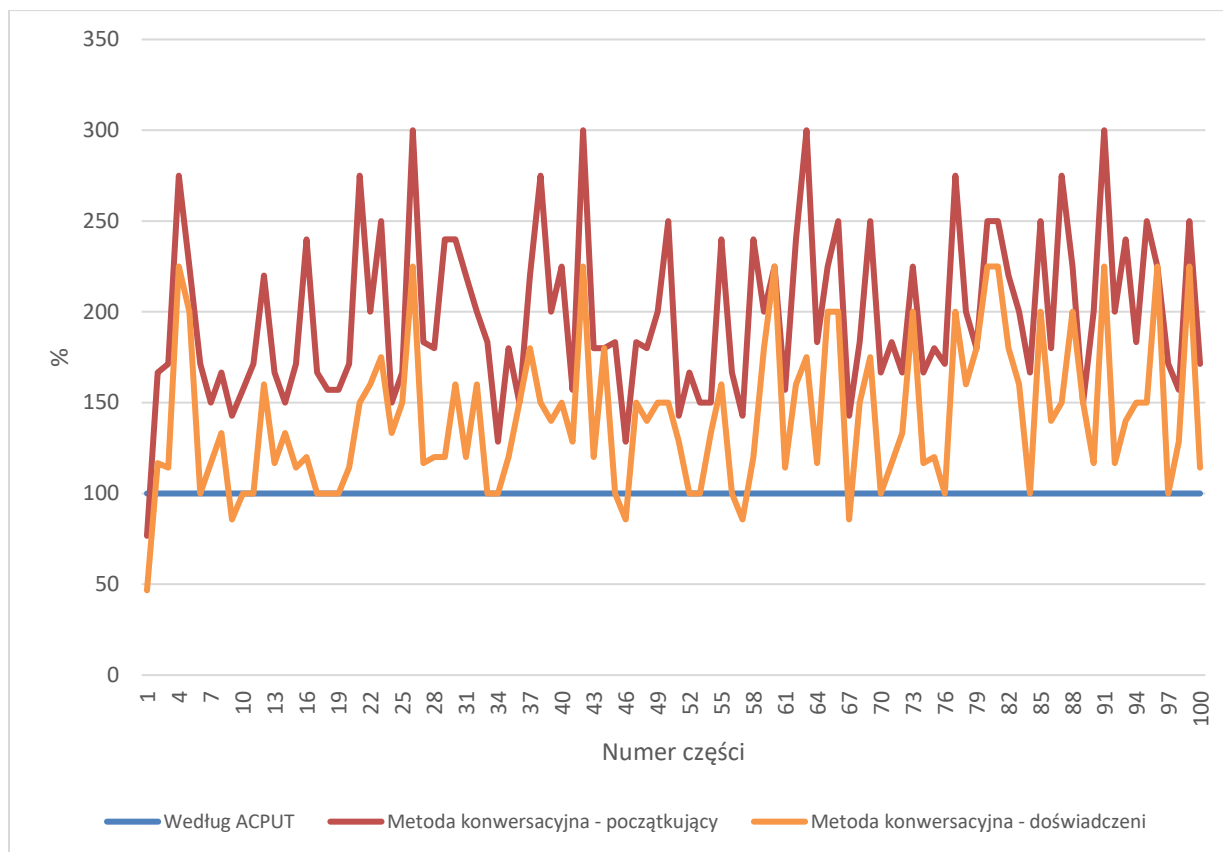


Na rysunku 8.39 zaznaczono różnice czasu programowania części z rodziny OS3. W przypadku części nr 1 różnica między początkującymi programistami wyniosła 14 [min], natomiast dla kolejnych części rodziny nie przekraczała 7 [min]. Wśród programistów doświadczonych różnice te wynosiły odpowiednio 9 [min] oraz 5 [min].



*Rys. 8.39 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych (dla pierwszych 10 części z rodziny OS3)*

Porównanie czasów przygotowania programów obróbki kolejnych części rodziny OS3 przez programistów początkujących oraz doświadczonych przedstawiono na rysunku 8.40. Czasy odniesiono do czasów programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT, przyjmując je jako 100%.

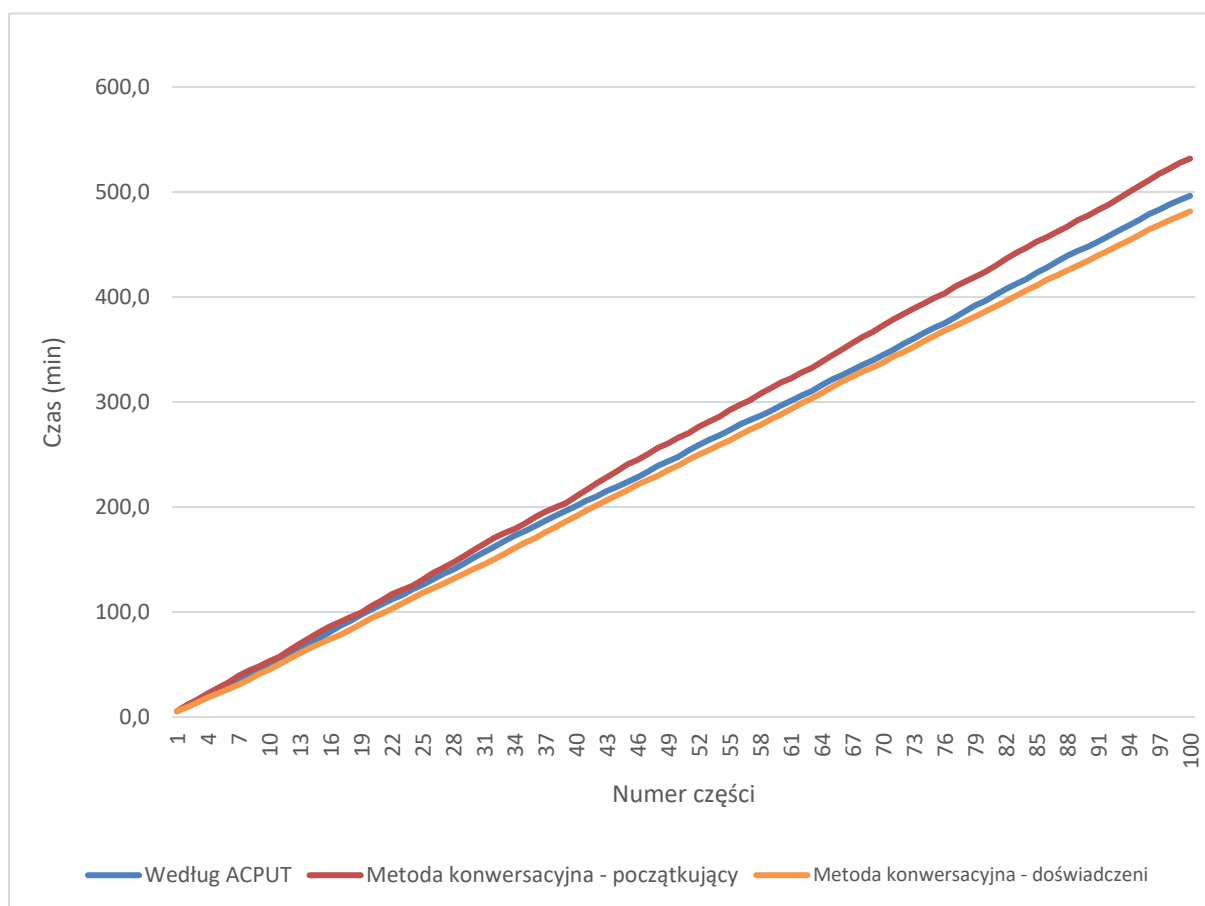


*Rys. 8.40 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS3 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT*

Zestawienie czasów obróbki poszczególnych części (na podstawie wyników symulacji), przedstawiono w tabeli 8.13 oraz zilustrowano na rysunkach. 8.41 oraz 8.42. Podobnie jak w poprzednich rodzinach różnice w czasach obróbki poszczególnych części są nieznaczne. Różnica czasu obróbki według programu przygotowanego z zastosowaniem metodyki ACPUT oraz programów przygotowanych przez doświadczonych programistów wyniosła 3% przy czym w tym wypadku czas obróbki według programów przygotowanych przez programistów okazał się krótszy. W przypadku programistów początkujących wyniosła 7,1% na korzyść metody ACPUT.

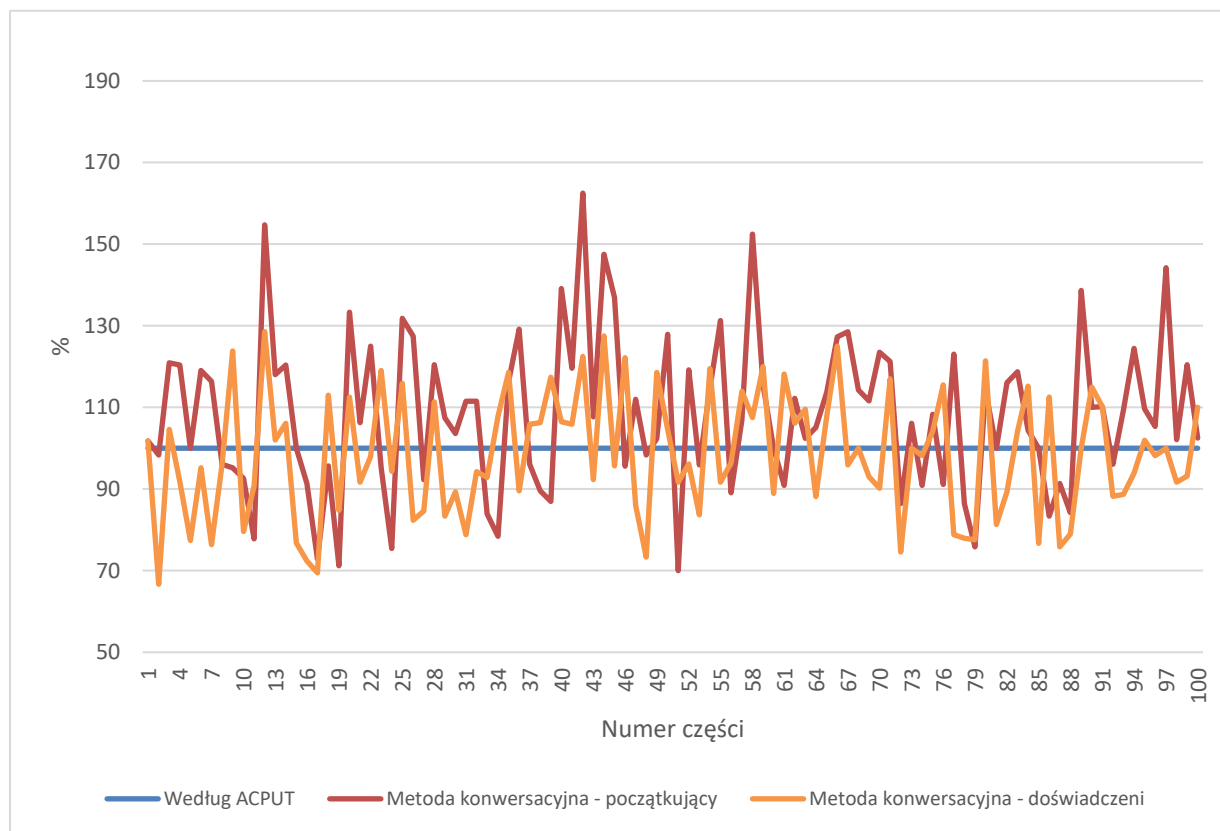
Tabela 8.13 Porównanie czasów obróbki części dla rodziny OS 3 (na podstawie wyników symulacji)

Część nr.	Czas obróbki [min]					
	Według ACPUT		Metoda konwersacyjna – początkujący (wyniki uśrednione)		Metoda konwersacyjna – doświadczeni (wyniki uśrednione)	
	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany	$T_i$	skumulowany
1	5,6	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6
2	5,9	11,5	5,9	11,5	4,0	9,6
3	5,2	15,8	5,2	16,7	4,5	14,1
4	5,9	20,7	5,9	22,6	4,5	18,6
5	5,3	26,0	5,3	27,9	4,1	22,7
6	5,0	30,2	5,0	32,9	4,0	26,7
7	6,4	35,7	6,4	39,3	4,2	30,9
8	4,9	40,8	4,9	44,2	4,9	35,8
9	4,0	45,0	4,0	48,2	5,2	41,0
10	5,0	50,4	5,0	53,2	4,3	45,3
...	...	...	...	...	...	...
40	4,6	201,0	6,4	210,1	4,9	190,2
60	5,4	296,7	5,4	318,5	4,8	288,2
80	4,2	396,2	4,8	423,9	5,1	386,3
<b>100</b>	<b>4,0</b>	<b>496,3</b>	<b>4,1</b>	<b>531,7</b>	<b>4,4</b>	<b>481,5</b>



Rys. 8.41 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Porównanie czasów obróbki (wyrażone w procentach) pojedynczych części z zastosowaniem programów przygotowanych według metodyki ACPUT oraz przez programistów jest zaprezentowane na rys 8.42.



Rys. 8.42 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

Skumulowany czas przygotowania programów obróbki oraz obróbki 100 części OS 3 wyniósł 1065,3 [min] w przypadku ACPUT, 1587,7 [min] w przypadku grupy programistów początkujących (co stanowi 149% czasu procedury ACPUT) i 1235,5 [min] w przypadku programistów doświadczonych (co stanowi 116% czasu procedury ACPUT) – patrz tabela 8.14.

Tabela 8.14 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)

	Całkowity czas przygotowania programów obróbki [min]	Całkowity czas obróbki [min]	Suma czasu przygotowania programów obróbki i obróbki [min]	Procent [%]
ACPUT	569	496,3	1065,3	100
Programiści początkujący	1056	531,7	1587,7	149
Programiści doświadczeni	754	481,5	1235,5	116

Zakładając  $P_{re} = 80$  [EUR/h] oraz  $P_{rb} = 60$  [EUR/h] koszt programowania obróbki pojedynczej części wyniósł:

- programiści początkujący – 10,6 [EUR],
- programiści doświadczeni – 10,1 [EUR],
- ACPUT – 5,8 [EUR].

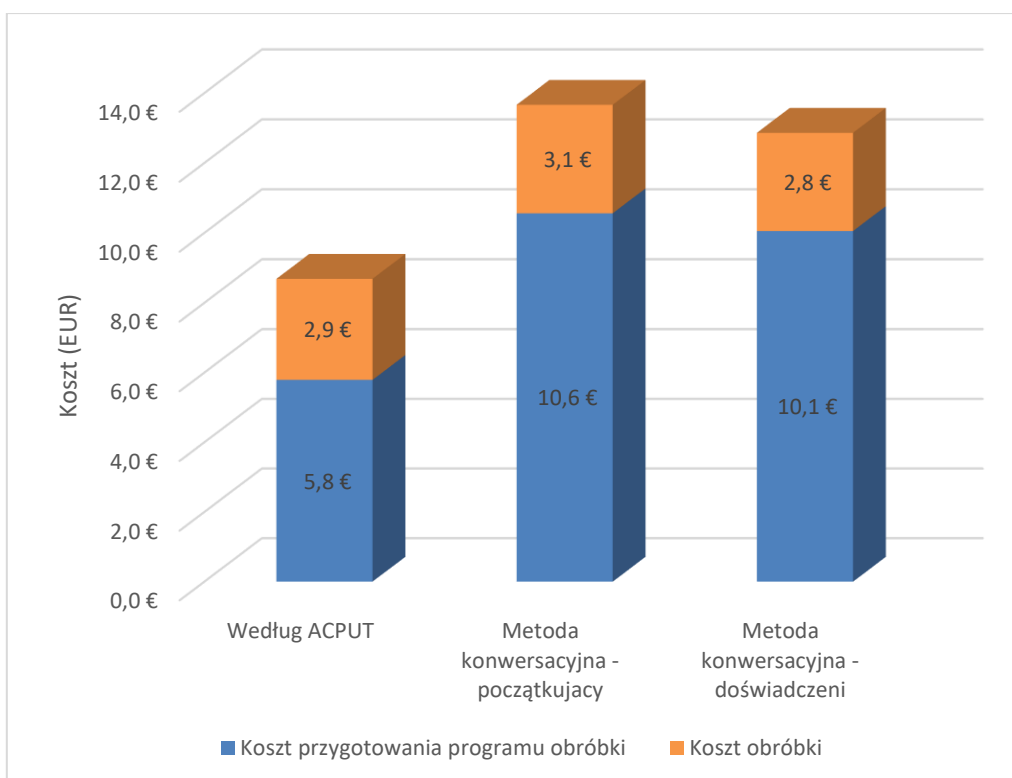
*Tabela 8.15 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego ( $MP_c$ ) wg trzech metod*

	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ – wzór	Koszt roboczogodziny $Pr$ [EUR]	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	$MP_c = [T_1/60 \times Pr_e + (T_r - T_1)/60 \times Pr_b] / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h, $Pr_b$ 60EUR/h	5,8	100
Programiści początkujący	$MP_c = (T_i/60 \times Pr_b) / G_s$	$Pr_b$ 60EUR/h	10,6	183
Programiści doświadczeni	$MP_c = (T_i/60 \times Pr_e) / G_s$	$Pr_e$ 80 EUR/h	10,1	174

W tabeli 8.16 oraz na rys. 8.43 przedstawiono porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części rodziny OS3.

*Tabela 8.16 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części ( $C_m$ ) wg trzech metod*

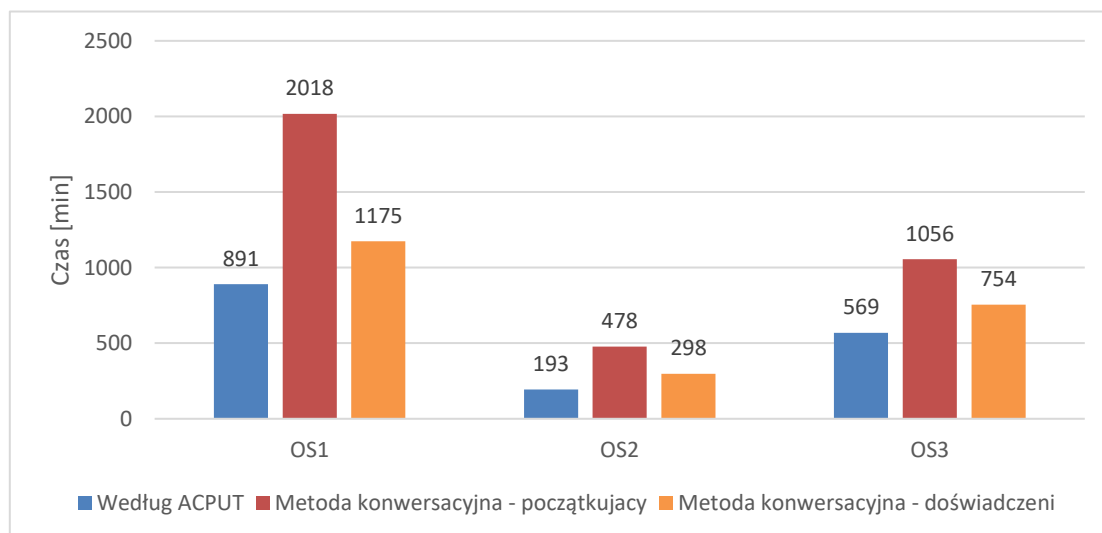
	Średni koszt przygotowania pojedynczego programu obróbkowego $MP_c$ [EUR]	Średni koszt obróbki pojedynczej części $Mm_c$ [EUR]	Średni indywidualny koszt wytworzenia części $C_m$ [EUR]	Procent [%]
ACPUT	5,8	2,9	8,7	100
Programiści początkujący	10,6	3,1	13,7	157
Programiści doświadczeni	10,1	2,8	12,9	148



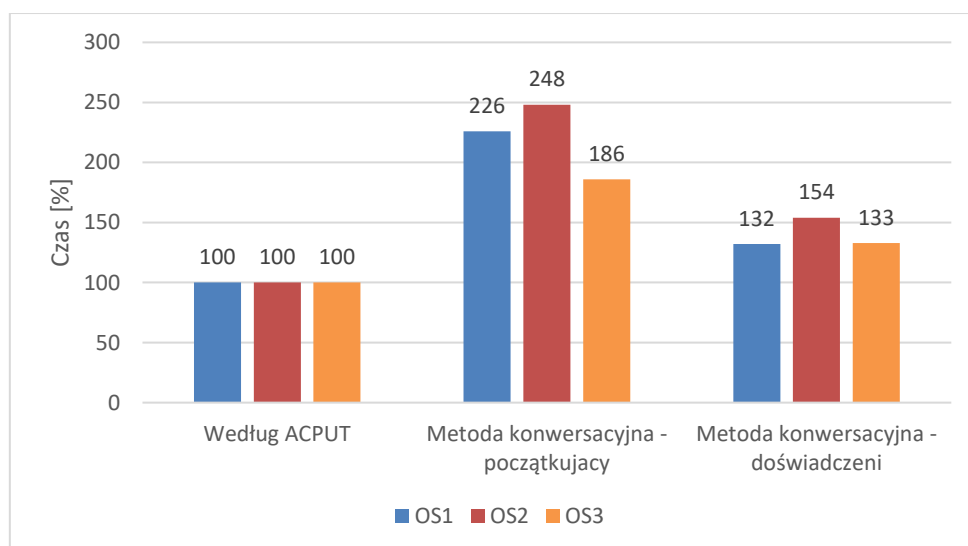
Rys. 8.43 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 3

## 8.5 Porównanie czasów programowania i obróbki części rodzin oprzyrządowania

Zestawienie czasów programowania obróbki poszczególnych rodzin przedstawiono na rysunkach 8.44 oraz 8.45. Metoda ACPUT okazała się metodą najwydajniejszą dla każdej z rodzin. W przypadku programistów początkujących czas programowania jest ponad dwukrotnie, natomiast w przypadku programistów doświadczonych o około 40% dłuższy niż czas programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT.

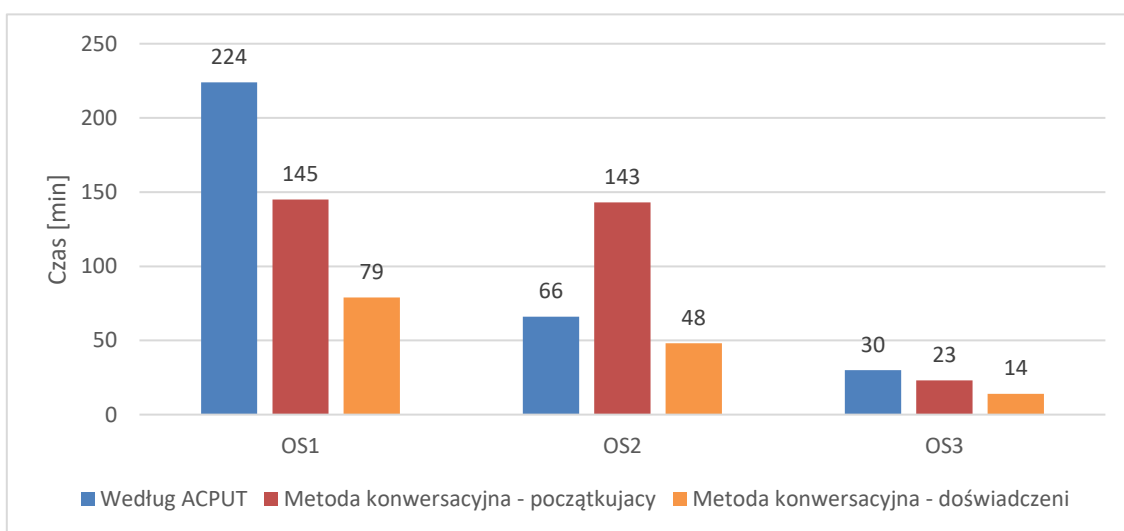


Rys. 8.44 Porównanie czasów programowania obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT

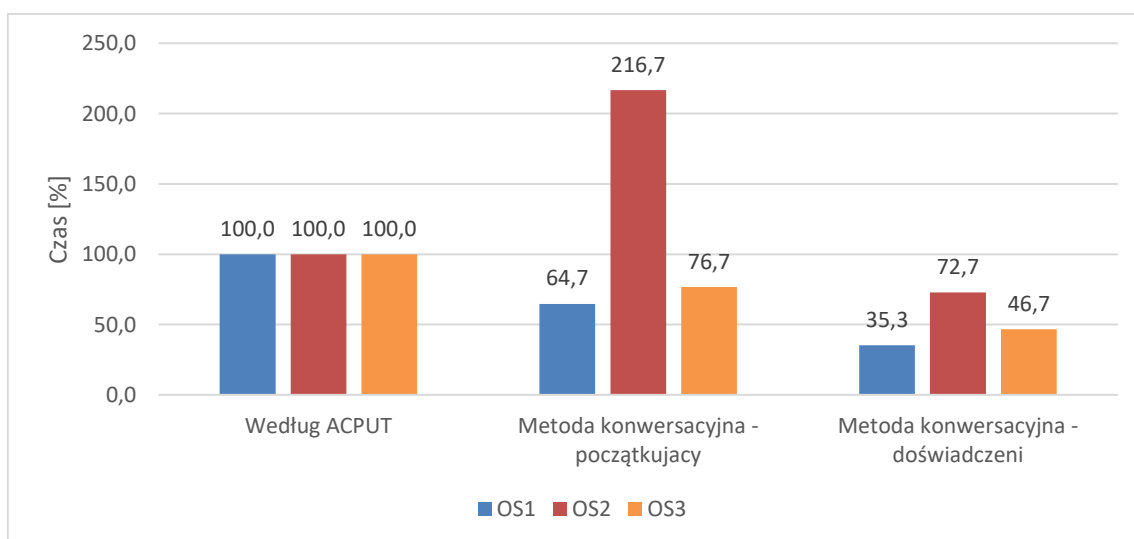


Rys. 8.45 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT

Czas programowania obróbki pierwszej części każdej z rodzin jest z kolei - w większości przypadków- dłuższy w programowaniu według ACPUT (rys. 8.46, rys. 8.47). Tworzony w ACPUT szablon obróbki jest bowiem tworzony dla reprezentanta rodziny (najbardziej skomplikowanej technologicznie części rodziny). Jego utworzenie wymaga odpowiednio dużego nakładu pracy ze względu na konieczność powiązania cech geometrycznych zabiegów obróbki z metadanymi modeli części.



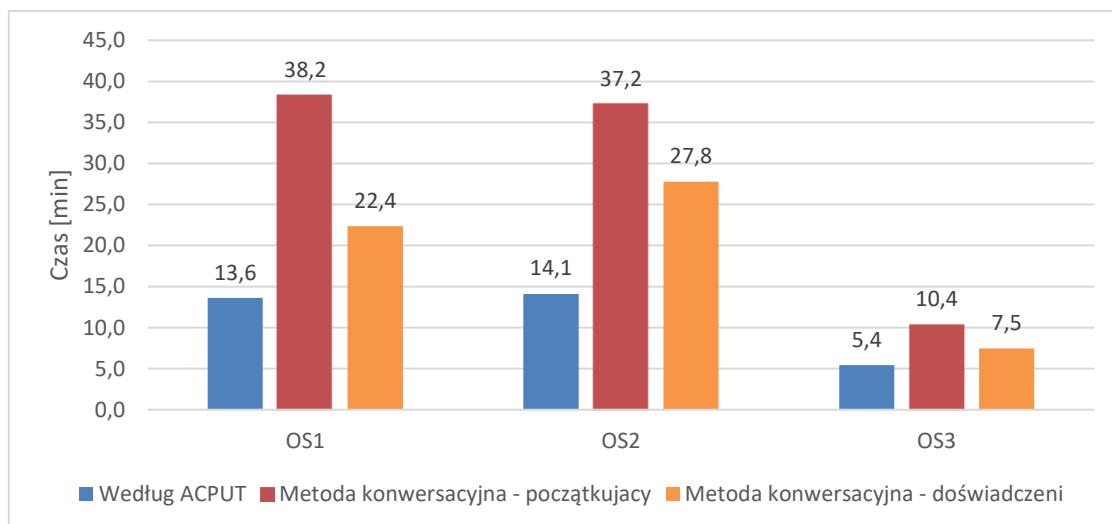
Rys. 8.46 Porównanie czasów programowania obróbki pierwszej części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT



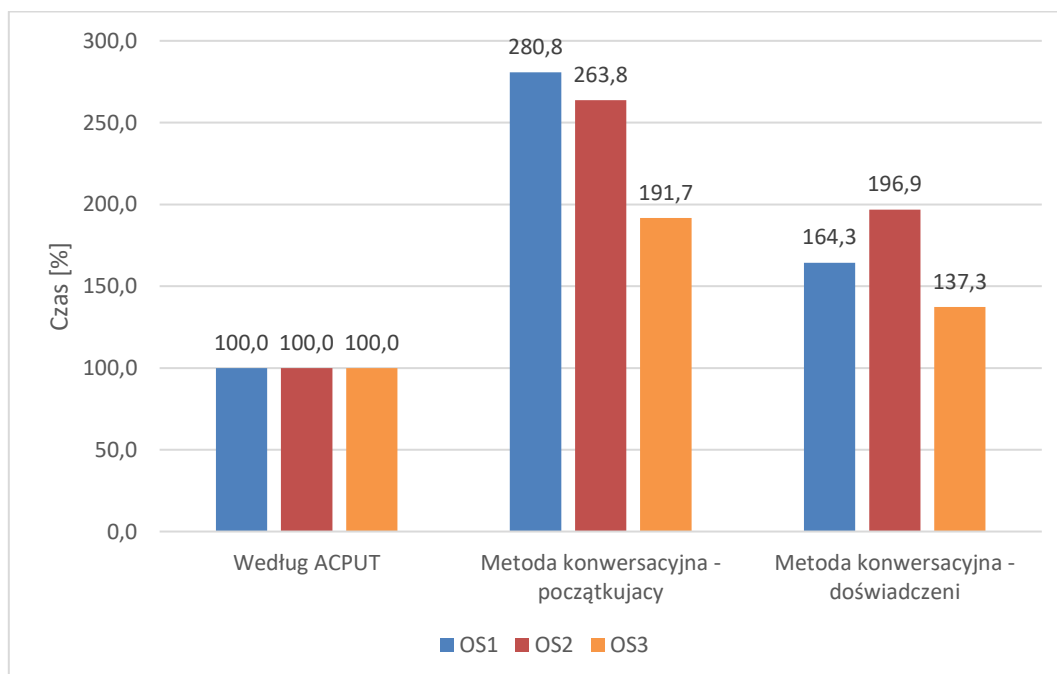
Rys. 8.47 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki pierwszej części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT



Korzyści ze stosowania ACPUT są wyraźnie widoczne przy programowaniu obróbki pozostałych (tzn. z wyłączeniem pierwszej) części rodziny, rysunek 8.48 oraz 8.49. Czas programowania z ACPUT jest prawie 2,5-krotnie krótszy w przypadku programowania przez mniej doświadczonego programistę i około 65% krótszy dla programisty doświadczonego.

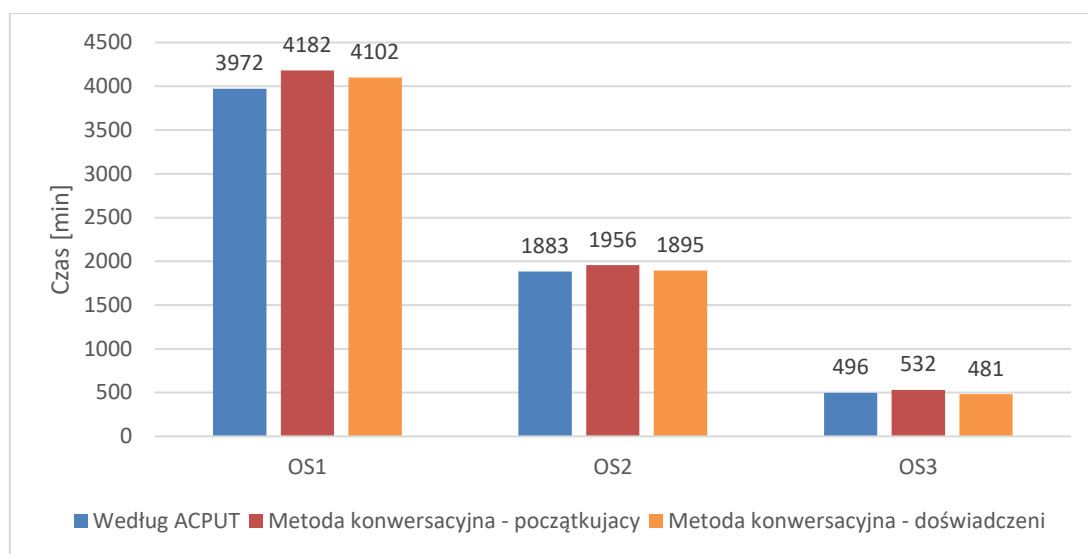


*Rys. 8.48 Porównanie czasów programowania obróbki pozostałych części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT*

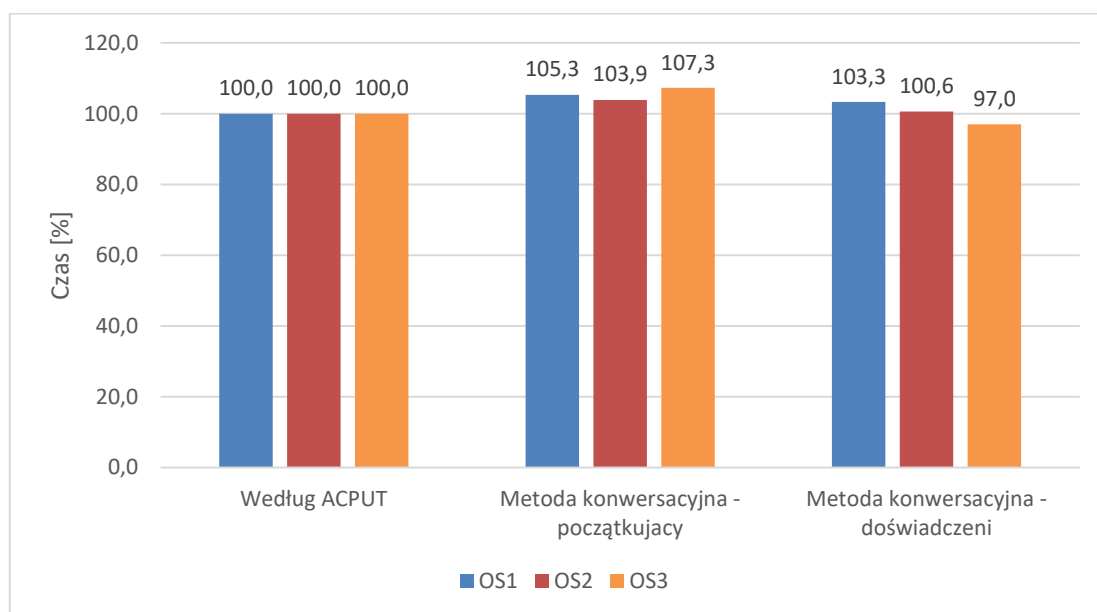


*Rys. 8.49 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki pozostałych części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT*

Rysunek 8.50, 8.51 przedstawiają porównanie czasów obróbki w zależności od metody programowania obróbki.



Rys. 8.50 Porównanie czasów obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT



Rys. 8.51 Porównanie procentowe czasów obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT

Różnice czasów obróbki są niewielkie i nie przekraczają 8%, a wynikają przede wszystkim z różnych parametrów podczas ruchów pomocniczych narzędzi, nieokreślonych w karcie technologicznej.

---

## Rozdział 9.

### Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac

Zaproponowana metodyka ACPUT stanowi uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy w obszarze automatyzacji programowania obróbki obrabiarek CNC w zintegrowanym środowisku CAD/CAM, skupiając się na specjalnym oprzyrządowaniu produkcyjnym.

#### 9.1 Wnioski ogólne

1. Strategia produkcji zorientowana na masową kastomizację wymaga nowego podejścia do programowania obróbki oprzyrządowania specjalnego dla obrabiarek CNC uwzględniającego automatyzację tego procesu.
2. Główną przeszkodą automatyzacji procesu programowania obróbki, w szczególności części OS, jest brak sprawdzonych i szeroko dostępnych metodyk, zwłaszcza wzorców proceduralnych, narzędzi, umożliwiających odpowiednie gromadzenie i zapisywanie wiedzy wypracowanej w przedsiębiorstwie na podstawie zebranych doświadczeń oraz reguł pozwalających ocenić zasadność automatyzacji programowania w zależności od liczby części tworzących rodzinę OS, stopnia ich podobieństwa oraz trudności wykonania.
3. Skuteczna automatyzacja programowania obróbki wymaga stosowania narzędzi z zakresu inżynierii wiedzy, ułatwiających pozyskiwanie i zapisywanie konkretnych danych oraz informacji o przebiegu procesu programowania obrabiarek CNC oraz narzędzi do oceny korzyści ze stosowania automatyzacji.
4. Zastosowanie metodyki ACPUT wprowadza standaryzację procesu programowania obróbki, podnosi efektywność budowy szablonów obróbki i zmniejsza ilość pracy potrzebną do ich budowy.
5. Zastosowanie metodyki ACPUT wspiera proces gromadzenia i zapisywania wiedzy w przedsiębiorstwie, stanowiącej jego „know how”.

#### 9.2 Wnioski praktyczne

1. Stosowanie metodyki ACPUT zwiększa efektywność programowania obróbki poprzez eliminację rutynowych powtarzalnych czynności w procesie programowania obróbki,

a opracowane zgodnie z metodyką szablony potwierdzają skrócenie czasu programowania obróbki (rys 8.44, rys 8.45)

2. Metodyka ACPUT jest opłacalna od pewnej liczby granicznej części. Liczba ta jest zależna od liczby zabiegów przypisanych do reprezentanta rodziny, która z zasady jest większa od liczby zabiegów w każdej z pozostałych części (w szczególnym przypadku może być równa). Różnica między liczbą zabiegów przypisanych reprezentantowi rodziny a średnią zabiegów wykonywanych na częściach rodziny zależy od stopnia zróżnicowania technologicznego części. Przy budowie szablonu obróbki - w odróżnieniu od programowania konwersacyjnego - konieczne jest także powiązanie cech geometrycznych części z odpowiednio przygotowanymi metadanymi (8.46, rys 8.47).

3. Programy przygotowane z zastosowaniem metodyki ACPUT nie różnią się strukturą czy liczbą zabiegów w stosunku do przygotowywanych metoda konwersacyjną, dlatego różnice czasów obróbki również są niewielkie (rys 8.50, rys 8.51).

4. W programach przygotowanych z zastosowaniem metodyki ACPUT występuje mniej błędów typograficznych lub związanych ze złym zaznaczeniem elementów niż w przypadku metody konwersacyjnej a tym samym poprawia się jakość programów obróbki.

5. Przygotowanie szablonu obróbki zgodnie z metodyką ACPUT wymaga kwalifikacji i kompetencji posiadanych przez doświadczonego programistę, natomiast korzystać z niego mogą zarówno programiści z grupy programistów początkujących jak i zaawansowanych.

### **9.3 Wnioski do dalszych prac**

1. 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. Połączenie metodyki ACPUT z odpowiednio przygotowanymi modelami autogenerującymi pozwoliłoby na eliminację tego etapu metodyki i przyczyniłoby się do jeszcze większego zwiększenia jej efektywności.

2. Zdaniem autora, dalszy rozwój prac powinien również skupiać się na badaniach i na opracowaniu narzędzi do automatycznej symulacji i weryfikacji programów obróbki (sprawdzenia ich pod kątem poprawności). Umożliwiłoby to wyeliminowanie pracy programisty po etapie przygotowania szablonu obróbki.

3. Autor planuje również prace związane z poszerzeniem możliwości stosowania metodyki do innych rodzin części będących jednocześnie wyrobami. Grupą, w której metodyka ACPUT znalazłaby zastosowanie są np. frezowane felgi aluminiowe, dźwignie zmiany biegów czy nakładki na pedały. Zaproponowana metodyka mogłaby być również stosowana przy produkcji frezowanych elementów złącznych (np. śrub, nakrętek, podkładek o nietypowych rozmiarach, z nietypowych materiałów) czy elementów przeniesienia napędu w postaci kół zębatach, zębatach łańcuchowych, sprzęgieł itp.

# Literatura

- Ambe, I. M., & Badenhorst-Weiss, J. A. (2010). Strategic supply chain framework for the automotive industry. *African Journal of Business Management*, 4(10), 2110.
- Ammar-Khodja, S., Perry, N., & Bernard, A. (2008). Processing knowledge to support knowledge-based engineering systems specification. *Concurrent Engineering*, 16(1), 89-101.
- Applehans W., Globe A. (1999), *Managing Knowledge. A Practical WEB-Based Approach*, Addison-Wesley
- Azab, A., Perusi, G., ElMaraghy, H. A., & Urbanic, J. (2007). Semi-generative macro-process planning for reconfigurable manufacturing. In *Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges* (pp. 251-258). Springer US.
- Babik, W. (2005). Zarządzanie wiedzą we współczesnych systemach informacyjnych. *Zagadnienia Informatyki Naukowej*, (1 (85)).
- Bahrammirzaee, A. (2010). A comparative survey of artificial intelligence applications in finance: artificial neural networks, expert system and hybrid intelligent systems. *Neural Computing and Applications*, 19(8), 1165-1195.
- Biedermann, M., Beutler, P., & Meboldt, M. (2022). Automated Knowledge-Based Design for Additive Manufacturing: A Case Study with Flow Manifolds. *Chemie Ingenieur Technik*, 94(7), 939-947.
- Beckman T. (1997), *A Methodology for Knowledge Management*, Intl. Asso. of Sc. & Tech. For Dev. (IASTED)
- Benedettini, O. (2022). Green servitization in the single-use medical device industry: how device OEMs create supply chain circularity through reprocessing. *Sustainability*, 14(19), 12670.
- Brousseau, E. B., Thiery, S., Arnal, B., Nyiri, E., Gibaru, O., & Mayor, J. R. (2017). A Computer-Aided Design and manufacturing implementation of the atomic force microscope tip-based nanomachining process for two-dimensional patterning. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 5(4).
- Calkins, D. E., Egging, N., & Scholz, C. (1999). Knowledge-based engineering (KBE) design methodology at the undergraduate and graduate levels. *development*, 21.
- Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., & De Felice, F. (2020). Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: Progress, trends, and directions. *Sustainability*, 12(2), 492.
- Chantzis, D., Liu, X., Politis, D. J., El Fakir, O., Chua, T. Y., Shi, Z., & Wang, L. (2020). Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 87-107.
- Chapman, C. B., & Pinfold, M. (1999). Design engineering—a need to rethink the solution using knowledge based engineering. *Knowledge-based systems*, 12(5-6), 257-267.
- Choi J.W., Kelly D., Raju J. (2007), A knowledge-based engineering tool to estimate cost and weight of composite aerospace structures at the conceptual stage of the design process, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 79 (2007)459–468.
- Curran R., Verhagen W. J. C., Van Tooren M. J. L. (2010), *The KNOMAD methodology for integration of multi-disciplinary engineering knowledge within aerospace production*, 48th AIAA, Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida

- Czech-Dudek, K. (2015). Zastosowanie systemów CAD/CAM w przygotowaniu produkcji. *Mechanik*, 88(7CD), 149-158.
- Wlazak, M., & Tjiptadi, A. T. (2019). Original Equipment Manufacturer (OEM) site selection of traditional medicine companies in Indonesia using Analytic Hierarchy Process (AHP) method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 598, No. 1, p. 012090). IOP Publishing.
- Dankwort, C. W., Weidlich, R., Guenther, B., & Blaurock, J. E. (2004). Engineers' CAx education—it's not only CAD. *Computer-Aided Design*, 36(14), 1439-1450.
- Davenport T. H., Prusak L. (1998), *Working knowledge: How organizations manage what they know*. Harvard Business Press
- David, J., Järvenpää, E., & Lobov, A. (2021, October). Digital threads via knowledge-based engineering systems. In *2021 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT* (pp. 42-51). IEEE.
- Day, G., Gasparri, E., & Aitchison, M. (2019). Knowledge-based design in industrialised house building: A case-study for prefabricated timber walls. *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, 989-1016.
- Day, G., Gasparri, E., & Aitchison, M. (2019). Knowledge-based design in industrialised house building: A case-study for prefabricated timber walls. *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, 989-1016.
- Deja, M., & Siemiatkowski, M. S. (2013). Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture. *Journal of intelligent manufacturing*, 24, 831-846.
- Deja, M., & Siemiatkowski, M. S. (2018). Machining process sequencing and machine assignment in generative feature-based CAPP for mill-turn parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 49-62.
- Duda, J. (2013). *Rozwój metod projektowania procesów technologicznych obróbki, Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją 2013*
- Duda, J., & Pobożniak, J. (2013). Machining process planning in PLM environment. *Jan Kazior*, 81.
- Duda, J., & Karpiuk, M. (2015). Koncepcja budowy systemu projektowania technologicznego w kontekście nowych strategii rozwojowych wyrobów.
- Duda, J., & Pobożniak, J. (2017). The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming. *Procedia Manufacturing*, 11, 501-508.
- Dym, C. L., & Levitt, R. E. (1991). *Knowledge-based systems in engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- Esan, A. O., Khan, M. K., Qi, H. S., & Naylor, C. (2013). Integrated manufacturing strategy for deployment of CAD/CAM methodology in a SMME. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(2), 257-273.
- Feld M. (2003), *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwo Naukowe PWN, WNT, 2003
- Fujiwara, T. (2022). Japanese SME Internationalization in Halal Food Industry: A Preliminary Study. *Journal of Halal Science and Technology*, 1(1), 38-54.
- Gembarski, P. C. (2022). Design Automation Case Study: Modular Locating Fixture. In *Proceedings of the 10th International Conference on Mass Customization and Personalization-Community of Europe (MCE-CE 2022)* (pp. 39-44). Novi Sad: University of Novi Sad-Faculty of Technical Sciences.

- Gonzalez, A. J., & Dankel, D. D. (1993). *The engineering of knowledge-based systems: theory and practice*. Prentice-Hall, Inc.
- Górski, F., Zawadzki, P., Hamrol, A. (2016). Knowledge based engineering as a condition of effective mass production of configurable products by design automation. *Journal of Machine Engineering*, 16.
- Grabowik, C., Kalinowski, K., Kempa, W. M., & Paprocka, I. (2014). A survey on CAPP systems development methods. In *Advanced Materials Research* (Vol. 837, pp. 387-392). Trans Tech Publications Ltd.
- Grzesik W., Niesłony P., Kiszka P. (2020), *Programowanie obrabiarek CNC*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020
- Habrat W. (2007), *Obsługa i programowanie obrabiarek CNC*, Wydawnictwo KaBe, 2007
- Hamrol A. (2018), *Strategie i praktyki sprawnego działania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018
- Hamrol, A., Gawlik, J., & Sładek, J. (2019). Mechanical engineering in Industry 4.0. *Management and Production Engineering Review*, 10, 14-28.
- Hislop, D., Bosua, R., & Helms, R. (2018). *Knowledge management in organizations: A critical introduction*. Oxford university press.
- Isnaini, M. M. R., & Shirase, K. (2014). Review of computer-aided process planning systems for machining operation—future development of a computer-aided process planning system. *International Journal of Automation Technology*, 8(3), 317-332.
- Jemielniak, D., & Koźmiński, A. K. (Eds.). (2021). *Zarządzanie wiedzą*. Wolters Kluwer Polska.
- Jost, P. J., & Süsser, T. (2020). Company-customer interaction in mass customization. *International journal of production economics*, 220, 107454.
- Juszczuk, P. (2020). *Systemy ekspertowe: program PCShell*. Retrieved December 1.
- Kamrani, A., & Vijayan, A. (2006). A methodology for integrated product development using design and manufacturing templates. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17(5), 656-672.
- Kendal, S. L., & Creen, M. (2007). *An introduction to knowledge engineering* (pp. 1-25). Springer London.
- Klier T., James R. 2008. Who really made your car? The Upjohn Institute, dostęp online na dzień 04.04.2023 - [https://research.upjohn.org/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1088&context=empl\\_research](https://research.upjohn.org/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1088&context=empl_research)
- Dachyar, F., & Daniele, G. (2022), Development of a Forecasting Model for Original Equipment Manufacturer (OEM). *Journal of Production Economics*, 119(1), 1-16.
- Kolletzki, M., Ohl, F., & Denk, M. (2022, May). Knowledge-based Engineering for System Optimization of Power Electronics including the Electric Motor Design. In *PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1-7). VDE.
- Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13, 121-136.
- Kowalski, M., & Zawadzki, P. (2019). Tooling CAD models preparation process for automated technology design system. In *Advances in Manufacturing II: Volume 2-Production Engineering and Management* (pp. 36-44). Springer International Publishing.



- Kowalski, M. (2020). Method of automatic CAM programming using machining templates. *Mechanik*, 93(1), 48-52.
- Kowalski, M., Zawadzki, P., & Hamrol, A. (2021). Effectiveness of Automatic CAM Programming Using Machining Templates for the Manufacture of Special Production Tooling. *Strojnicki Vestnik- Journal of Mechanical Engineering*, 67(10), 475-489.
- Kowalski, M., & Zawadzki, P. (2022). Advantages of Automatic CAM Programming in Industrial Practice—A Case Study. In *Advances in Manufacturing III: Volume 1-Mechanical Engineering: Research and Technology Innovations, Industry 4.0* (pp. 138-148). Cham: Springer International Publishing.
- Kowalski, M., & Zawadzki, P. (2022, May). Intelligent manufacturing templates for CNC machine programming. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2198, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
- Kumar, S. L. (2017). State of the art-intense review on artificial intelligence systems application in process planning and manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 65, 294-329.
- Kügler, P., Dworschak, F., Schleich, B., & Wartzack, S. (2023). The evolution of knowledge-based engineering from a design research perspective: Literature review 2012–2021. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101892.
- Lacerda, A. P., Xambre, A. R., & Alvelos, H. M. (2016). Applying Value Stream Mapping to eliminate waste: a case study of an original equipment manufacturer for the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 54(6), 1708-1720.
- Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., & Marto, C. (2017). Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1671-1676.
- Lee K. (1999). *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*.
- Lee, D. C., & Kim, S. Y. (2017). Utilization of machining templates to improve 5-axis CAM machining process. *Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering*, 11(1), 45-49.
- Lempp, M., Siegfried, P., Lempp, M., & Siegfried, P. (2022). Characterization of the Automotive Industry. *Automotive Disruption and the Urban Mobility Revolution: Rethinking the Business Model 2030*, 7-24.
- Lewandowski J., Skołod B., Plinta D. (2014), *Organizacja systemów produkcyjnych, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji*, PWE 2014
- Madan, A. K., Krishna, K., & Kumar, B. (2022), *A Survey and Feasibility Research Study on Computer Aided Process Planning (CAPP)*.
- Masoumi, S. M., Kazemi, N., & Abdul-Rashid, S. H. (2019). Sustainable supply chain management in the automotive industry: A process-oriented review. *Sustainability*, 11(14), 3945.
- Miller, T. (2019). Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial intelligence*, 267, 1-38.
- Mohamad, M. H., & Zahid, M. N. O. (2018). Development of machining simulation application using visual basic programming in NX CAM system environment. *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day, 2018*, 73-74.
- Pająk, E. (2022). *Zarządzanie produkcją: produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Petruš, M., Michalik, P., Straka, L., Hrabovsky, L., Macej, J., Tirpak, P., & Jusko, J. (2019). The evaluation of the production of the shaped part using the workshop programming method on the two-spindle multi-axis CTX alpha 500 lathe. *Open Engineering*, 9(1), 660-667.
- Perkasa, L. (2019). Automated generation of CNC programs for manufacturing: A Review. *Journal of Mechanical Science and Engineering*, 6(2), 035-039.
- Pinfold, M., & Chapman, C. (2001). The application of KBE techniques to the FE model creation of an automotive body structure. *Computers in Industry*, 44(1), 1-10.
- Pokojski J. (2005), *Systemy doradcze w projektowaniu maszyn*. WNT, Warszawa 2005
- Pritschow, G., & Vieffhaus, R. (1987). WORKSHOP PROGRAMMING OF NUMERICAL CONTROLS. In *Human-Computer Interaction-INTERACT'87* (pp. 505-511). North-Holland.
- Reddy, E. J., Sridhar, C. N. V., & Rangadu, V. P. (2015). Knowledge based engineering: notion, approaches and future trends. *American Journal of Intelligent Systems*, 5(1), 1-17.
- Rivera, C. A., Poza, J., Ugalde, G., & Almandoz, G. (2020). Industrial design of electric machines supported with knowledge-based engineering systems. *Applied Sciences*, 11(1), 294.
- Sabadka, D., Molnár, V., & Fedorko, G. (2019). Shortening of life cycle and complexity impact on the automotive industry. *TEM Journal*, 8(4), 1295.
- Saibene, A., Assale, M., & Giltri, M. (2021). Expert systems: Definitions, advantages and issues in medical field applications. *Expert Systems with Applications*, 177, 114900.
- Sarfraz, M. S., Hong, H., & Kim, S. S. (2021). Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study. *Composite Structures*, 266, 113864.
- Sarvankar, S. G., & Yewale, S. N. (2019). Additive manufacturing in automobile industry. *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng.*, 7(4), 1-10.
- Sateesh, P., & Mahesh, P. V. (2017). A methodology for feature extraction and recognition for CAD/CAM integration using step file. *Int. J. Res. Innov. (IJRI)*, 4(1), 711-725.
- Schaede, C., Seifermann, S., & Metternich, J. (2018). Automated generation of CNC programs for manufacturing of individualized products. *Procedia CIRP*, 72, 1251-1257.
- Schreiber G. (2008), *Knowledge Engineering, Handbook of Knowledge Representation* by F. van Harmelen, V. Lifschitz and B. Porter, 2008 Elsevier B.V.
- Silva de Oliveira, C., Sanin, C., & Szczerbicki, E. (2022). Smart knowledge engineering for cognitive systems: a brief overview. *Cybernetics and Systems*, 53(5), 384-402.
- Sivakumar, S., & Dhanalakshmi, V. (2013). A feature-based system for CAD/CAM integration through STEP file for cylindrical parts.
- Skarka W. (2007), *Metodologia procesu projektowo-konstrukcyjnego opartego na wiedzy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007
- Skarka, W. (2010). Using Knowledge-based Engineering Methods in Designing with Modular Components of Assembly Systems. In *DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia* (pp. 1837-1846).
- Soori, M., & Asmael, M. (2021). Classification of research and applications of the computer aided process planning in manufacturing systems. *Independent Journal of Management & Production*, 12(5), 1250-1281.
- Stokes M. (2001), *Managing Engineering Knowledge; MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications*, Professional Engineering Publishing, Londyn 2001

- Szatkowski K. Nowoczesne zarządzanie produkcją, Ujęcie procesowe (2014), Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014
- Tagowski M., & Zaborski A. (2016), Przygotowanie produkcji wyrobów na OSN przy zastosowaniu systemów CAD/CAM. *Mechanik*, 7, 846-847.
- Tan, C. F., Kher, V. K., & Ismail, N. (2013). Design of a feature recognition system for CAD/CAM integration. *World Applied Sciences Journal*, 21(8), 1162-1166.
- Tan, C. F., Wahidin, L. S., Khalil, S. N., Tamaldin, N., Hu, J., & Rauterberg, G. W. M. (2016). The application of expert system: A review of research and applications. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), 2448-2453.
- Tan, X. J., Cheor, W. L., Yeo, K. S., & Leow, W. Z. (2022). Expert systems in oil palm precision agriculture: A decade systematic review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.
- Tiwari V., Jain P.K., Tandon P. (2013), Design process automation KBE, Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol. II, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K.
- Trajer J., Paszek A., Iwan S. (2012), Zarządzanie wiedzą. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2012.
- Turban E., Aronson J.E. (2001), Decision Support Systems and Intelligent Systems, 6th Ed., Saddle River, NJ, Prentice Hall
- Van der Laan A.H. (2008), Knowledge based engineering support for aircraft component design, in: Design of Aircraft and Rotorcraft, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, 2008, pp. 254
- Verhagen, W. J., Bermell-Garcia, P., Van Dijk, R. E., & Curran, R. (2012). A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 5-15.
- Verma, A. K., & Rajotia, S. (2010). A review of machining feature recognition methodologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4), 353-368.
- Wiig K. (1995), Knowledge Management Methods: Practical Approaches to Managing Knowledge, Schema Press
- Whitney, D. E., Dong, Q., Judson, J., & Mascoli, G. (1999, September). Introducing knowledge-based engineering into an interconnected product development process. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 19739, pp. 351-360). American Society of Mechanical Engineers.
- Wlazlak, P., Säfsten, K., & Hilletoth, P. (2019). Original equipment manufacturer (OEM)-supplier integration to prepare for production ramp-up. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(2), 506-530.
- Xu, X., Klemm, P., Proctor, F., & Suh, S. H. (2006). STEP-compliant process planning and manufacturing.
- Xu, X., Wang, L., & Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning—A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1-31.
- Xu, T., Chen, Z., Li, J., & Yan, X. (2015). Automatic tool path generation from structuralized machining process integrated with CAD/CAPP/CAM system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1097-1111.
- Xue, C. T. S. (2017). A literature review on knowledge management in organizations. *Research in Business and Management*, 4(1), 30-41.

- Yan, X., & Melkote, S. (2023). Automated manufacturability analysis and machining process selection using deep generative model and Siamese neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 57-67.
- Yelapure, S. J., & Kulkarni, R. V. (2012). Literature review on expert system in agriculture. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(5), 5086-5089.
- Zaborski A., & Tubielewicz, K. (2007). Przygotowanie produkcji przy zastosowaniu systemów komputerowych. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 56 (sp. 1), 127-138.
- Zawadzki, P., & Żywicki, K. (2016). Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept. *Management and production engineering review*.
- Zawadzki, P. (2018). Methodology of KBE system development for automated design of multivariant products. In *Advances in Manufacturing*, 239-248. Springer, Cham.
- Zhang, Z., Jaiswal, P., & Rai, R. (2018). FeatureNet: Machining feature recognition based on 3d convolution neural network. *Computer-Aided Design*, 101, 12-22.
- Zhang, M., Guo, H., Huo, B., Zhao, X., & Huang, J. (2019). Linking supply chain quality integration with mass customization and product modularity. *International journal of production economics*, 207, 227-235.
- Zhou, J., & Camba, J. D. (2021). Computer-aided process planning in immersive environments: A critical review. *Computers in Industry*, 133, 103547.
- Zhou, G., Yang, X., Zhang, C., Li, Z., & Xiao, Z. (2019). Deep learning enabled cutting tool selection for special-shaped machining features of complex products. *Advances in Engineering Software*, 133, 1-11.

#### Normy i inne dokumenty:

CATIADOC – dokumentacja program Catia, dostęp online 04.04.2023 - <http://catiadoc.free.fr/>

DIN 66025-1 Numerical control of machines, format; general requirements

EZCAM - Artykuł internetowy: „Feature & Hole Recognition”, dostęp online 04.04.2023 - <https://ezcam.com/feature-recognition>,

Heidenhain (2019), Instrukcja obsługi dla użytkownika. Programowanie dialogowe., Heidenhain 2019

ISO 6983-1:2009 - numeryczne sterowanie maszyn — Format programu i definicje słów adresowych

SinuTrain, Milling made easy with ShopMill – Training Documentation 2006, Sinumerik, Siemens

SinuTrain, Turning made easy with ShopTurn - Training Documentation 2010, Sinumerik, Siemens

Quadraxol - Artykuł internetowy: Benefits of Fusion 360 / Inventor CAM templates dostęp online 04.04.2023 - <https://www.quadraxol.co.uk/blog/benefits-of-inventor-cam-templates/>

## Spis rysunków

Rys. 1.1 Podstawowe zadania realizowane w procesie wytwarzania OS [opracowanie własne] .....	11
Rys. 1.2 Skala skomplikowania wariantów OS na przykładzie rur samochodu osobowego [opracowanie własne] .....	13
Rys. 1.3 Przykład transparentnej masowej kastomizacji – warianty kosiarek [opracowanie własne]..	13
Rys. 1.4 Proces wytwarzania OS w zintegrowanym środowisku CAD/CAM [opracowanie własne] .....	15
Rys. 2.1 Schemat programowania ręcznego [na podstawie Habrat 2007] .....	17
Rys. 2.2 Przykład kodu sterującego w formacie G [opracowanie własne] .....	18
Rys. 2.3 Nakładka „Shopmill” wspomagająca programowanie [SinuTrain 2006] .....	19
Rys. 2.4 Przebieg procesu projektowania procesów technologicznych obróbki w systemie CAD/CAM. T-zakres działań realizowanych przez technologa, A-zakres działań realizowanych przez komputer [Duda 2013] .....	21
Rys. 2.5 Definiowanie geometrii dla zabiegu w systemie CATIA [opracowanie własne] .....	21
Rys. 3.1 Integracja konstrukcyjno-technologiczna w systemach CAD/CAM [opracowanie własne] ....	24
Rys. 3.2 Idea stosowania szablonów obróbki [Quadrason] .....	27
Rys. 3.3 Efekt automatycznego rozpoznawania cech geometrycznych modelu CAD [EZCAM] .....	28
Rys. 3.4 Wybrane cechy geometryczne rozpoznawane w metodzie FR [Zhang et al. 2018] .....	28
Rys. 3.5 Forma do wciskania rur (po lewej) oraz rura samochodowego układu chłodzenia silnika (po prawej) [opracowanie własne] .....	29
Rys. 3.6 Przykłady różnych wariantów form do wciskania rur [opracowanie własne] .....	29
Rys. 3.7 Przykłady cech geometrycznych wykrywanych w systemie CATIA [opracowanie własne na podstawie CATIADOC] .....	30
Rys. 3.8 Fragment karty technologicznej dla operacji obróbki formy do wciskania rur [opracowanie własne] .....	32
Rys. 3.9 Instrukcja obróbki – zabieg frezowanie kieszeni [opracowanie własne] .....	32
Rys. 3.10 Cechy geometryczne modelu formy rozpoznane automatyczne przez funkcję FR systemu CATIA [opracowanie własne] .....	33
Rys. 4.1 Hierarchia wiedzy w systemie informatycznym [Appelhans et al. 1999] .....	38
Rys. 4.2 Etapy metodyki MDAVP [Zawadzki 2018] .....	42
Rys. 4.3 Schemat wspomaganie wyboru najlepszej orientacji ułożenia modelu w przestrzeni maszyny [Zhang et al. 2018] .....	43
Rys. 4.4 Schemat porównujący tradycyjne, ręczne modelowanie CAD z podejściem zautomatyzowanym [Biederman et al.2022] .....	44
Rys. 6.1 Schemat metodyki ACPUT .....	51
Rys. 6.2 Powstawanie reprezentanta rodziny .....	52
Rys. 6.3 Przykład karty technologicznej obróbki reprezentanta wybranej rodziny .....	53
Rys. 6.4 Opis metadanych na wybranym reprezentancie rodziny .....	54

---

Rys. 6.5 Widok szablonu obróbki dla geometrycznego reprezentanta danej rodziny części.....	55
Rys. 6.6 Zakres automatyzacji programowania CAM w metodyce ACPUT .....	56
Rys. 7.1 Model konceptualny projektowanej bazy danych w notacji BPMN .....	59
Rys. 7.2 Widok interfejsu aplikacji bazodanowej .....	60
Rys. 7.3 Formularz „rodziny części” – przegląd zasobów .....	61
Rys. 7.4 Formularz „rodziny części” – podgląd wybranej części .....	61
Rys. 7.5 Formularz „rodziny części” – podgląd dostępnych póffabrykatów .....	61
Rys. 7.6 Formularz „rodziny części” – prognozowanie czasu czas przygotowania programu obróbki .	62
Rys. 7.7 Formularz „obrabiarki” – przegląd zasobów bazy .....	62
Rys. 7.8 Formularz „narzędzia” – przegląd zasobów bazy .....	63
Rys. 7.9 Formularz „zabiegi technologiczne” – przegląd zasobów bazy .....	64
Rys. 7.10 Formularz „operacje technologiczne” – przegląd zasobów bazy .....	65
Rys. 7.11 Formularz „karty technologiczne” – przegląd zasobów bazy .....	65
Rys. 7.12 Przykład karty technologicznej wygenerowanej z aplikacji bazodanowej.....	66
Rys. 7.13 Formularz archiwizacji czasów przygotowania programów obróbki.....	67
Rys. 7.14 Wyniki prognozowanego czasu potrzebnego do przygotowania programów obróbki.....	69
Rys. 8.1 Widok modelu oprzyrządowania montażowego rur (A), modelu CAD wybranej części oprzyrządowania (B) z rodziny OS 1 oraz rzeczywistej postaci oprzyrządowania (C) .....	72
Rys. 8.2 Wybór reprezentanta rodziny OS 1 .....	73
Rys. 8.3 Karta technologiczna rodziny OS 1 .....	74
Rys. 8.4 Lista zabiegów stworzona dla reprezentanta rodziny OS1 .....	74
Rys. 8.5 Operacja technologiczna rodziny OS1 .....	75
Rys. 8.6 Metadane zapisane w wybranych wariantach części rodziny OS 1 .....	76
Rys. 8.7 Struktura szablonu obróbki dla OS 1.....	77
Rys. 8.8 Podmiana danych opisujących wariant części - po lewej poprzedni, po prawej następny .....	78
Rys. 8.9 Efekt podmiany danych wejściowych w szablonie .....	78
Rys. 8.10 Automatyczny dobór zabiegów na podstawie metadanych modelu części – wyłączenie zabiegów dla nierozpoznanych elementów geometrycznych .....	79
Rys. 8.11 Prawidłowy wynik symulacji .....	80
Rys. 8.12 Kolidzja narzędzia z obrabianą częścią.....	80
Rys. 8.13 „Wejście” narzędzia w obrabianą część z szybkim posuwem.....	81
Rys. 8.14 Wybór postprocesora (A) oraz fragment kodu programu obróbki dla jednego z wariantów części rodziny OS 1 w ostatecznej postaci (B) .....	82
Rys. 8.15 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT) .....	83
Rys. 8.16 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych (dla pierwszych 10 części z rodziny OS1).....	84

---

Rys. 8.17 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS1 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT	85
Rys. 8.18 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	86
Rys. 8.19 Porównanie czasów obróbki poszczególnych części OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	87
Rys. 8.20 Wykres kosztów wytwarzania rodziny OS 1	90
Rys. 8.21 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 1	90
Rys. 8.22 Widok modelu oprzyrządowania spawalniczego OS 2	91
Rys. 8.23 Widok modeli 3D części rodziny OS 2	91
Rys. 8.24 Reprezentant rodziny OS 2	92
Rys. 8.25 Karta technologiczna rodziny OS 2	92
Rys. 8.26 Metadane oraz struktura szablonu obróbki rodziny OS 2	93
Rys. 8.27 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	95
Rys. 8.28 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych dla części z rodziny OS2	95
Rys. 8.29 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS2 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT	96
Rys. 8.30 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	97
Rys. 8.31 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	98
Rys. 8.32 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 2	100
Rys. 8.33 Widok rzeczywistego oprzyrządowania spawalniczego do zgrzewania punktowego	100
Rys. 8.34 Widok modeli 3D części rodziny OS 3	101
Rys. 8.35 Stworzony reprezentant rodziny OS 3	101
Rys. 8.36 Karta technologiczna rodziny OS 3	102
Rys. 8.37 Metadane oraz struktura szablonu obróbki rodziny OS 3	102
Rys. 8.38 Skumulowany czas programowania obróbki rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	104
Rys. 8.39 Różnice czasu programowania w grupie programistów początkujących oraz doświadczonych (dla pierwszych 10 części z rodziny OS3)	105
Rys. 8.40 Porównanie czasów programowania obróbki części rodziny OS3 przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT	106
Rys. 8.41 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	107
Rys. 8.42 Skumulowany czas obróbki części rodziny OS 3 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT)	108

---

Rys. 8.43 Porównanie kosztów wytwarzania pojedynczej części z rodziny OS 3 .....	110
Rys. 8.44 Porównanie czasów programowania obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	111
Rys. 8.45 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	111
Rys. 8.46 Porównanie czasów programowania obróbki pierwszej części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	112
Rys. 8.47 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki pierwszej części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT.....	112
Rys. 8.48 Porównanie czasów programowania obróbki pozostałych części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	113
Rys. 8.49 Porównanie procentowe czasów programowania obróbki pozostałych części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT.....	113
Rys. 8.50 Porównanie czasów obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	114
Rys. 8.51 Porównanie procentowe czasów obróbki rodzin części przez programistów początkujących oraz doświadczonych z czasem programowania z zastosowaniem metodyki ACPUT .....	114



## Spis tabel

Tabela 8.1 Porównanie liczby części i liczby cech geometrycznych dla rodzin oprzyrządowania specjalnego.....	70
Tabela 8.2 Porównanie czasów programowania obróbki dla rodziny części OS 1.....	83
Tabela 8.3 Porównanie czasów obróbki części rodziny dla OS 1 (na podstawie wyników symulacji) ...	86
Tabela 8.4 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 1 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT).....	87
Tabela 8.5 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego (MPc) wg trzech metod.....	89
Tabela 8.6 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części (Cm) wg trzech metod....	89
Tabela 8.7 Porównanie czasów programowania obróbki dla rodziny części OS 2.....	94
Tabela 8.8 Porównanie czasów obróbki części rodziny dla OS 2 (na podstawie wyników symulacji) ..	97
Tabela 8.9 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT).....	98
Tabela 8.10 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego (MPc) wg trzech metod .....	99
Tabela 8.11 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części (Cm) wg trzech metod..	99
Tabela 8.12 Porównanie czasów przygotowania programów obróbki dla OS 3 .....	104
Tabela 8.13 Porównanie czasów obróbki części dla rodziny OS 3 (na podstawie wyników symulacji) .....	107
Tabela 8.14 Porównanie całkowitych czasów przygotowania programów obróbki i obróbki OS 2 (programiści początkujący, programiści doświadczeni, metodyka ACPUT).....	108
Tabela 8.15 Porównanie średniego kosztu przygotowania pojedynczego programu obróbkowego (MPc) wg trzech metod .....	109
Tabela 8.16 Porównanie średnich kosztów wytworzenia pojedynczej części (Cm) wg trzech metod	109