

# SYSTEM EKSPERTOWY DO PLANOWANIA PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH OBRÓBKI SKRAWANIEM

Edward CHLEBUS, Kamil KROT, Michał KULIBERDA

**Streszczenie:** W przedstawionym artykule opisano szkieletowy system ekspertowy do planowania procesów technologicznych, charakteryzujący się rozszerzoną funkcjonalnością w porównaniu z typowym systemem regułowym. Funkcjonalność ta obejmuje rozwiązania niezbędne w prawidłowym zapisie wiedzy technologicznej tj.: hierarchiczne zależności pomiędzy elementami bazy wiedzy, dedykowane klasy reguł. Reguły te wykorzystywane są do: identyfikacji technologicznych obiektów elementarnych, doboru operacji obróbki oraz sekwencjonowania i grupowania obiektów.

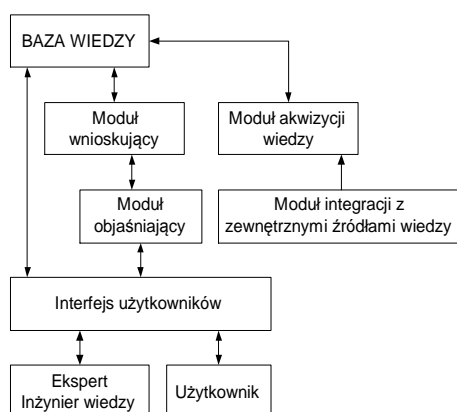
**Słowa kluczowe:** technologia, system ekspertowy, planowanie procesów.

## 1. Wprowadzenie

Techniczne przygotowanie produkcji stanowi bardzo istotny zakres prac, wpływający na czas zarezerwowany na kompleksowy rozwój produktu. W ciągłym dążeniu do minimalizacji tego czasu, jak również usprawnieniu wszystkich etapów przygotowania produkcji, opracowuje się coraz nowsze rozwiązania w organizacji pracy oraz narzędzia ułatwiające jej realizację. Opracowanie technologii obróbki skrawaniem stanowi istotną część zadań przewidzianych w przygotowaniu produkcji. W celu usprawnienia pracy technologów, zajmujących się przygotowaniem technologii wytwarzania, opracowuje się różnej klasy systemy komputerowe usprawniające pracę tych osób. Szeroko wykorzystywane są bazy danych materiałów na półfabrykaty, katalogi narzędzi i pomocy warsztatowych, systemy CAM (ang. Computer Aided Manufacturing) wspomagające generowanie ścieżek narzędzi na obrabiarki sterowanie numeryczne. Brak jest jednak nadal rozwiązań komercyjnych wspierających wszystkie obszary pracy technologa. Komputerowe systemy wspomagające planowanie procesów technologicznych CAPP (ang. Computer Aided Process Planning) z założenia mają być systemami realizującymi taką właśnie funkcję. Współcześnie rozwijane systemy CAPP typu generacyjnego zakładają dążenie do zminimalizowania pracy technologa tylko do podejmowania kluczowych decyzji technologicznych oraz obsługi systemu [1, 2]. W celu tak sprawnego działania systemów CAPP konieczne staje się zaimplementowanie modułów odpowiedzialnych za przetwarzanie danych geometrycznych części, planowanie procesów technologicznych, dobór zasobów produkcyjnych, oprzyrządowania i stanowisk pracy. Etapy wymagające przetwarzania danych liczbowych związanych z geometrią modelu, wymiarami, parametrami technologicznymi są stosunkowo łatwe do implementacji. Problemem jest zbudowanie modułów systemu CAPP, których zadaniem jest wspomaganie procesu decyzyjnego w opracowaniu technologii. Stosowane są różne metody w tym obszarze. Autorzy zdecydowali się na wykorzystanie systemu ekspertowego, jako narzędzia, umożliwiającego formalny zapis wiedzy technologicznej oraz przetwarzanie tej wiedzy w opracowaniu procesów.

## 2. Zastosowanie systemów ekspertowych w planowaniu procesów technologicznych

Istnieje wiele metod reprezentacji wiedzy, do najpopularniejszych należą: reprezentacja regułowa i reprezentacja ramowa [3, 6]. Pierwsza z nich, szerzej stosowana, jest podstawą tzw. regułowych systemów ekspertowych. Systemy te wykorzystywane są od wielu lat do rozwiązywania złożonych problemów na podstawie zgromadzonej w nich wiedzy. Strukturę takiego systemu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Architektura systemu ekspertowego [4]

Podstawowym elementem każdego systemu ekspertowego jest moduł wnioskujący. Jest to część systemu odpowiedzialna za przetwarzanie wiedzy zgromadzonej w bazie wiedzy, pozyskiwanie nowych faktów na podstawie przetwarzania reguł lub konwersacji z użytkownikiem.

Mechanizm wnioskowania działa wg jednego z dwóch schematów: wnioskowania wstecz i wnioskowania wprzód. Pierwszy mechanizm ma za zadanie potwierdzić postawioną przez użytkownika hipotezę poprzez analizę reguł. Potwierdzenie lub zaprzeczenie prawdziwości warunków reguł może wymagać sprawdzenia kolejnych reguł bądź przejścia do tzw. trybu konwersacji. Jest to tryb, w którym system zadaje pytania użytkownikowi, w celu dodania faktów do bazy wiedzy. Efektem procesu wnioskowania wstecz jest potwierdzenie bądź niepotwierdzenie hipotezy. Drugi przypadek nie musi oznaczać, że postawiona hipoteza nie jest prawdziwa – może zaistnieć sytuacja, gdy w bazie wiedzy brak wystarczającej liczby faktów do jej potwierdzenia. Działanie mechanizmu wnioskowania wprzód przebiega w odwrotnej kolejności. System ekspertowy analizuje zawarte w bazie wiedzy fakty i w procesie przetwarzania reguł próbuje ustalić nowe. Pojawienie się nowych faktów może spowodować wykonanie kolejnych reguł i dodanie kolejnych faktów. Z uwagi na sposób działania do celów diagnostycznych stosowany jest raczej mechanizm wnioskowania wstecz.

Moduł akwizycji wiedzy umożliwia rozbudowę istniejących i tworzenie nowych baz wiedzy, w których przechowywana jest wiedza ekspercka z określonej dziedziny. Proces akwizycji wiedzy wymaga zaangażowania, poza samym ekspertem, również tzw. inżyniera wiedzy, którego zadaniem jest translacja eksperckiego procesu decyzyjnego na zbiór reguł decyzyjnych.

Moduł objaśniania pozwala zrozumieć użytkownikowi przebieg wnioskowania w systemie. System prezentuje użytkownikowi dodane fakty oraz użyte reguły.

Kluczowym elementem systemu ekspertowego jest baza wiedzy. Jest to zbiór tzw. faktów i reguł. Fakty opisują najczęściej parametry analizowanego obiektu i opisywane są za pomocą trójki  $\langle O, A, W \rangle$  - obiektu, atrybutu i wartości. Z kolei reguły odzwierciedlają proces decyzyjny eksperta i składają się z dwóch części – części warunkowej i konkluzji. Część warunkowa zawiera listę warunków połączonych funktorami logicznymi. Konkluzja ma postać trójki  $\langle O, A, W \rangle$  i przedstawia cechę lub parametr obiektu, który jest prawdziwy, gdy warunki z części warunkowej są spełnione.

Dostępne są na rynku tzw. szkieletowe systemy ekspertowe, czyli systemy pozbawione wiedzy z konkretnej dziedziny, a posiadające wszystkie pozostałe mechanizmy. Rozwiązania takie są często stosowane do zapisu wiedzy eksperckiej, która jest możliwa do zapisu w postaci listy reguł i faktów.

W planowaniu procesów technologicznych systemy ekspertowe wykorzystywane są najczęściej do wyboru postaci i materiału półfabrykatu, identyfikacji technologicznych obiektów elementarnych oraz ustalenia rodzaju i kolejności operacji technologicznych. Znane są prace zawierające implementacje szkieletowych systemów ekspertowych w obszarze planowania procesów technologicznych [2]. Rozwiązania takie charakteryzują się jednak znacznymi utrudnieniami w zakresie możliwości zapisu wiedzy technologicznej oraz jej przetwarzania. Spowodowane jest to stosowaniem uniwersalnych szkieletowych systemów ekspertowych, umożliwiających teoretycznie zapis wiedzy z bardzo odległych dziedzin. W szkieletowych, regułowych systemach ekspertowych brak jest rozwiązań umożliwiających:

- zapis hierarchicznego modelu wiedzy technologicznej,
- zarządzania kolejnością faktów w bazie wiedzy,
- zapis złożonych funkcji matematycznych w warunkowych częściach reguł.

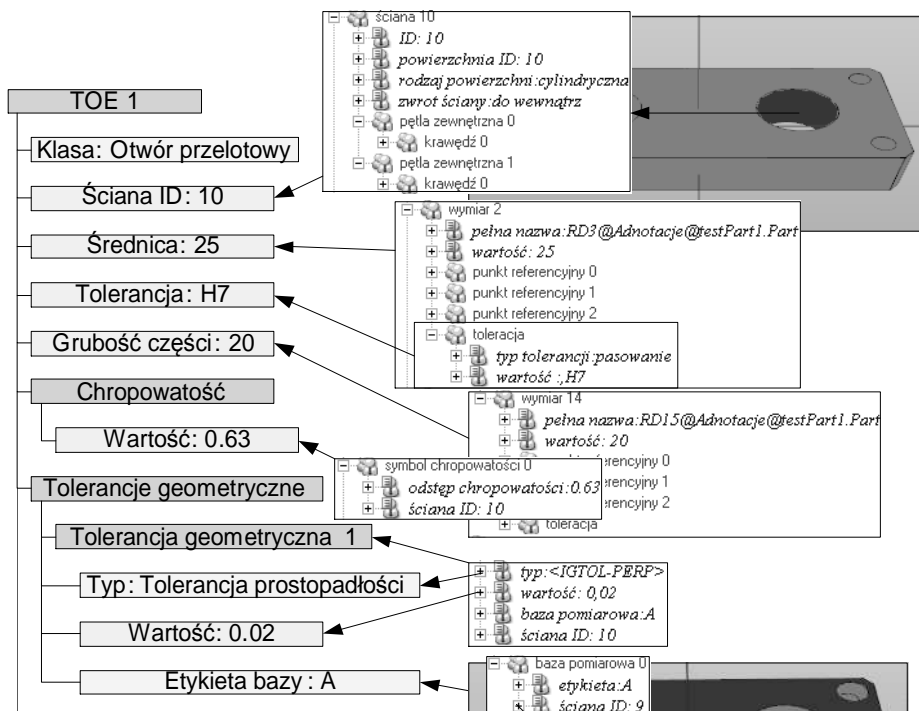
Z uwagi na wymienione cechy szkieletowych, regułowych systemów ekspertowych autorzy zdecydowali się na opracowanie własnego systemu ekspertowego umożliwiającego pełny opis wiedzy technologicznej oraz dogodny sposób jej przetwarzania.

### **3. Specjalny, regułowy system ekspertowy dla potrzeb CAPP**

Opracowany w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej system ekspertowy na potrzeby planowania procesów technologicznych charakteryzuje się następującymi cechami:

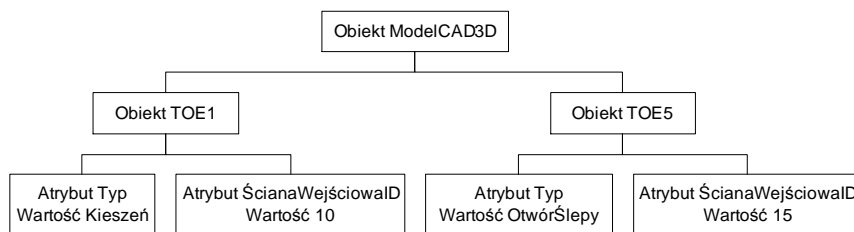
- umożliwia modelowanie struktur hierarchicznych,
- zawiera dodatkowe klasy reguł decyzyjnych umożliwiających:
  - identyfikację technologicznych obiektów elementarnych (TOE),
  - przyporządkowywanie operacji obróbkowych poszczególnym TOE,
  - parametryzowanie operacji obróbkowych,
  - grupowanie TOE w zamocowania,
  - sortowanie TOE.

Hierarchiczna struktura bazy wiedzy faktów, umożliwia modelowanie relacji typu „rodzic-potomek”. Przykład takiej struktury przedstawiono na rys. 2. W konsekwencji obiekt nie jest identyfikowany wyłącznie przez nazwę, ale również przez jego położenie w strukturze bazy wiedzy. Dzięki temu możliwe stało się dublowanie nazw w obrębie różnych podstruktur, umożliwiające stosowanie nazewnictwa adekwatnego do określanych cech.



Rys. 2. Fragment struktury hierarchicznej bazy wiedzy technologicznej

Atrybut „średnica” może występować wielokrotnie w bazie wiedzy oznaczając wartość wymiarową przypisaną do różnych obiektów np. atrybut „średnica” obiektu „otwór przelotowy”. Przykładowy fragment struktury tego typu przedstawia rys. 3.

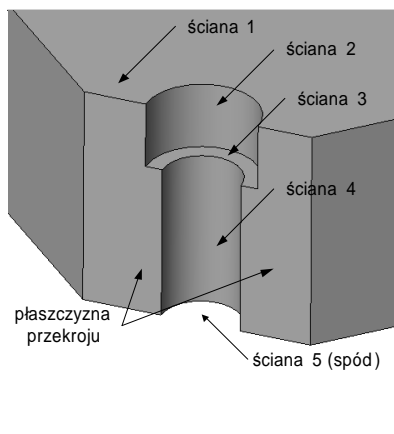


Rys. 3. Hierarchiczna zależność między atrybutami i obiektami w bazie wiedzy technologicznej opracowanego systemu ekspertowego [5]

Oprócz hierarchicznych zależności w bazie wiedzy opracowano rozwiązania umożliwiające deklarowanie reguł o bardziej złożonej funkcjonalności niż w klasycznych szkieletowych systemach ekspertowych. Opracowano klasę reguł przeszukujących, których zadaniem jest znalezienie w bazie wiedzy grupy obiektów spełniających zadane zależności. Mechanizm wyszukiwania umożliwia pominięcie części nazwy obiektu, a przez to

wyszukanie grupy obiektów o nazwie zawierającej wpisany fragment nazwy obiektu. Reguły tego typu mają zastosowanie w identyfikacji technologicznych obiektów elementarnych (TOE), będących grupami ścian, o określonych parametrach i zależnościach.

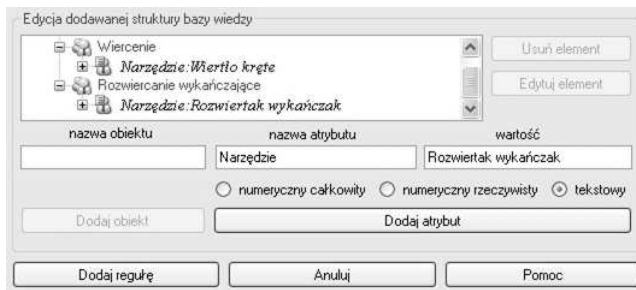
Drugim obszarem zastosowania reguł przeszukujących jest przypisanie zidentyfikowanym TOE operacji obróbkowych. Dla reguł identyfikujących technologiczne obiekty elementarne opracowano zbiór dopuszczalnych relacji geometrycznych między ścianami umożliwiającą dogodny zapis warunków identyfikacji. Użytkownik przy definiowaniu wzorców TOE określa relacje między ścianami na poziomie określenia „równoległość”, „styczność”, co w systemie przekształcane jest na zbiór zależności matematycznych między parametrami ścian modelu geometrycznego. Dzięki temu znacznie ułatwiono etap definiowania wzorców TOE, jak również zminimalizowano ryzyko popełniania błędów przy ich definiowaniu. Przykład warunków identyfikacji obiektu technologicznego przedstawia rys. 4.



	ściana 1	ściana 2	ściana 3	ściana 4	ściana 5
tworzy obiekt	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE
powierzchnia	PLANARNA	CYLINDR.	PLANARNA	CYLINDR.	PLAN.
	ściana 1	ściana 2	ściana 3	ściana 4	ściana 5
ściana 1					
ściana 2	prostokątne, wypukłość, wspólna krawędź (pętla)				
ściana 3		wspólna krawędź (pętla)			
ściana 4			wspólna krawędź (pętla)		
ściana 5	równoległe, normalne na zewnątrz		równoległe, normalne na zewnątrz	prostokątne, wypukłość, wspólna krawędź (pętla)	

Rys. 4. Warunki identyfikacji obiektu technologicznego klasy otwór stopniowy

Reguła przypisująca operacje obróbkowe do poszczególnych TOE posiada formularz umożliwiający określenie hierarchicznej struktury <O... O,A,W> - <obiekt..... ,obiekt, atrybut, wartość> - rys 5.



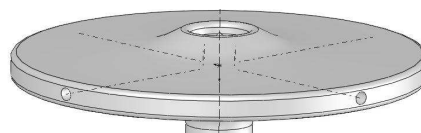
Rys. 5. Fragment szablonu przypisywania operacji obróbkowych do TOE, umożliwiający edycję części struktury procesu technologicznego

Kolejną kategorią, dedykowanych do zastosowań w planowaniu technologii, są reguły sortujące obiekty w bazie wiedzy. Opracowano je w celu określenia krytycznej kolejności obróbki pojedynczych TOE, czyli takiej kolejności, która uwzględnia następstwo operacji wymuszone zależnościami technologicznymi. Przykładem takiej zależności jest obróbka baz pomiarowych, wykonana wcześniej, niż obróbka TOE, gdzie występują tolerancje położenia i kształtu, odwołujące się do wspomnianych baz.

Ostatnia klasa opracowanych reguł to „reguły grupujące”, których zadaniem jest umożliwienie użytkownikowi łączenia TOE w grupy obiektów obrabiane w jednym zamocowaniu. Mechanizm grupowania zachowuje wcześniej ustaloną kolejność obróbki.

#### 4. Weryfikacja działania systemu – dobór materiału na półfabrykat

Przedstawiony powyżej regułowy system ekspertowy przetestowano na przykładzie części obrotowej przedstawionej na rys. 6. Funkcjonalnie część przeznaczona jest do pracy w ruchu obrotowym, wokół pionowej osi z obrotami rzędu kilkudziesięciu tys. obr/min. Jest to część obciążona głównie siłą odśrodkową. Wartość tej siły zależy wprost od gęstości materiału oraz obrotów. Przedstawiona część produkowana będzie jednostkowo, wobec tego przyjęto założenie odnośnie postaci półfabrykatu dostępnego handlowo. Zbudowano reguły systemu ekspertowego, wspomagającego



Rys. 6. Model CAD 3D części testowej

procesu doboru półfabrykatu dla części klasy „tarcza poddana obciążeniom siłą odśrodkową”. Reguły te uwzględniają zależności pomiędzy najważniejszymi, dla rozpatrywanego przypadku, charakterystykami materiału: gęstością oraz wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$ . Oprócz wartości wytrzymałościowych reguły zawierają odniesienia do ceny materiału oraz wielkości produkcji. Przyjęto trzy możliwe materiały na półfabrykat: stal konstrukcyjna St7, stop tytanu Ti6Al4V, stop aluminium AlZn5Mg3Cu (7022). Wymienione materiały charakteryzują się różnymi wartościami wytrzymałości na rozciąganie i gęstości, wybrano je w celu przedstawienia funkcjonowania systemu ekspertowego.

Rysunek 7 zawiera okno definicji atrybutu w opracowanym systemie ekspertowym. Przedstawiony formularz umożliwia dodawanie atrybutów trzech typów: numeryczny o wartościach całkowitych, numeryczny o wartościach rzeczywistych oraz wartościach tekstowych (ciąg znaków alfanumerycznych). Przy wyborze typu numerycznego można zawęzić zakres wartości do określonego przedziału, zbioru przedziałów, zbioru określonych wartości. Przy deklaracji atrybutu istnieje możliwość przypisania konkretnej wartości atrybutowi, co jest równoważne z dodaniem faktu do bazy wiedzy. Funkcjonalność ta może być wykorzystana we wnioskowaniu podczas analizy reguł. Oprócz wymienionych parametrów atrybutu można zdefiniować sposób określania jego wartości w procesie wnioskowania. Wartość ta może być określona w drodze konwersacji czyli wprowadzona przez użytkownika lub wywnioskowana przez system na podstawie reguł. Ponadto możliwe jest również określenie, który z tych sposobów ma być użyty jako pierwszy.

Konsekwencją przyjęcia hierarchicznej struktury bazy wiedzy jest ustalenie zależności „rodzic-potomek” między definiowanym atrybutem, a obiektem wcześniej wprowadzonym do bazy wiedzy. Kolejnym etapem po wprowadzeniu atrybutów jest dodanie reguł systemu ekspertowego – rys. 8. Przedstawiony sposób dodawania reguły przebiega trójetapowo.

Warunkowa część reguły pozwala na wykorzystanie zależności między atrybutami oraz budowanie złożonych relacji pomiędzy ich wartościami.

Rys. 7. Formularz dodawania atrybutu w systemie ekspertowym

Rys. 8. Dodawanie reguły w systemie ekspertowym: a) typ reguły, b) zapis elementarnego warunku, c) deklarowanie konkluzji

Efektym działania opracowanego fragmentu bazy wiedzy jest dobór materiału uzależniony od wprowadzonych przez użytkownika warunków brzegowych dotyczących problemu tj.: istotności ceny oraz dostępności materiału konstrukcyjnego, wymiarów gabarytowych oraz obrotów z jakimi rozpatrywany dysk ma pracować.

## 5. Podsumowanie

Opracowany system ekspertowy zawiera rozwiązania umożliwiające prawidłowy zapis wiedzy technologicznej poprzez zaimplementowane moduły, posiadające funkcjonalność w zakresie klasycznych reguł decyzyjnych oraz dedykowanych do zastosowań w planowaniu technologii. Zaprezentowane w artykule klasyczne reguły mogą być wykorzystywane do zapisu wiedzy technologicznej, dotyczącej wstępnych etapów opracowania technologii jak: dobór materiału i postaci półfabrykatu czy oszacowanie wielkości produkcji. Specjalne klasy reguł umożliwiają natomiast analizę parametrów modelu geometrycznego części poprzez ich przetwarzanie w zbiór technologicznych obiektów elementarnych. Kolejne zagadnienia możliwe do rozwiązania za pomocą opracowanego systemu to przypisywanie zidentyfikowanym obiektom operacji technologicznych, sortowanie tych operacji oraz ich grupowanie w zamocowania.

## Literatura

1. Krot K., Chlebus E.: Aplikacja parametrycznych danych modeli CAD 3D w planowaniu procesów wytwarzania Cz. 2. Mechanik, nr 7/2007, str. 586-589.
2. Krot K., Kuliberda M.: Metody integracji systemów CAD i CAPP. Przegląd Mechaniczny, nr 7-8 2008, str. 47-50.
3. Knosala R i Zespół: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
4. Jagielski J.: Inżynieria wiedzy. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, 2005.
5. Kuliberda M.: Opracowanie wybranych modułów opartego na wiedzy, generacyjnego systemu CAPP. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 2009.
6. Bubnicki Z., Grzech A. (red.): Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe. T. 1. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wrocław, 2003.

Prof. dr hab. inż. Edward CHLEBUS  
Dr inż. Kamil KROT  
Dr inż. Michał KULIBERDA  
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji  
Politechnika Wroclawska  
50-371 Wrocław, ul. Ignacego Łukasiewicza 5  
tel./fax.: (0-71) 320 20 46/ (0-71) 328 06 70  
e-mail: edward.chlebus@pwr.wroc.pl  
kamil.krot@pwr.wroc.pl  
michal.kuliberda@pwr.wroc.pl