

Piotr Kuryło

Uniwersytet Zielonogórski

PROBLEMATYKA WIELOKRYTERIALNEGO WYBORU KOMPETENCJI PRACOWNICZYCH

Streszczenie

Praca jest analizą wybranych problemów związanych z wielokryterialną optymalizacją przy wyborze przyszłych kompetencji pracowniczych – profesjonalistów biorących bezpośredni udział w procesach produkcyjnych. W pracy przeanalizowana została także problematyka związana z realizacją procesów produkcyjnych w funkcji podejmowanych decyzji w zakresie wybranych zadań produkcyjnych. Omówiona została także problematyka, kryteria oraz metody wielokryterialnej optymalizacji procesów produkcyjnych.

Słowa kluczowe: optymalizacja, kryteria optymalizacji, proces produkcyjny.

MULTI-CRITERION SELECTION ISSUES OF EMPLOYEE COMPETENCES

Abstract

The work is an analysis of selected problems related to multi-criterion optimization in the selection of future professional competencies – professionals directly involved in the production processes. The work also analyzes the issues connected with the realization of production processes as a function of decisions made in the scope of selected production tasks. Problems, criteria and methods of multi-criterion optimization of production processes were also discussed.

Key words: optimization, optimization criteria, production process.

Wstęp

Postęp technologiczny, jaki dokonuje się na świecie, sprawia, iż współczesny przemysł poszukuje pracownika wykwalifikowanego, poszukuje specjalisty gotowego do podjęcia zadań produkcyjnych "z marszu" zaraz po zatrudnieniu go. Bardzo duża ilość informacji, jakimi bombardowani jesteśmy przez środki masowego przekazu - telewizję, radio, Internet, sprawia także potrzebę systematyzowania i porządkowania tych informacji. Sprawia wreszcie potrzebę ustalenia kryteriów i zakresu wiedzy, wg których będzie można uznać, iż zatrudniany pracownik jest w swojej działalności profesjonalistą.

Jak trudnych wyborów musi dokonywać współczesny człowiek w wyborze dalszego swojego zajęcia, wykształcenia, pogłębiania swojej wiedzy pokazuje przykład wielokryterialnego wyboru realizacji procesów wytwórczych, w których istotą jest znalezienie optymalnego rozwiązania.

Współczesny młody człowiek planując swoją karierę zawodową może opierać się na następujących kryteriach:

- pieniądze,
- ciekawość poznania,
- miejsce pracy (lokalizacja pracodawcy, lokalizacja miejsca pracy, dostępne środki pracy itd.),
- perspektywy, możliwość awansu, wzrost wynagrodzenia,
- możliwości wyjazdów (krajowych, zagranicznych),
- uciążliwość warunków pracy,
- czas pracy (unormowany, nienormowany, w pracy, przed i po pracy),
- umiejętności (te wymagane do podjęcia pracy i te, które nabywa się w trakcie pracy (szkolenia, kursy etc.)),
- środowisko (z kim pracować?, gdzie pracować?),
- predyspozycje (fizyczne, psychiczne etc.).

W tym aspekcie ważne staje się pytanie, wg jakich kryteriów dokonywać wyboru, aby wszystkie życiowe plany i potrzeby człowieka mogły być zaspokojone. Wreszcie, jakie kryteria wyboru należy z góry ustalić, aby zaspokojone były także wszystkie potrzeby w zakresie realizacji różnorodnych procesów produkcyjnych. W warunkach gospodarki rynkowej, podejmowanie produkcji nowych wyrobów coraz częściej jest przedsięwzięciem o charakterze jednorazowym, niepowtarzalnym i nie mającym precedensu. W takiej sytuacji ocena wariantów rozwiązań przy zastosowaniu jednego kryterium (mającego zwykle bardzo jasną interpretację, np. kryterium kosztu, a także dającego się dostatecznie dokładnie określić już w fazie projektowania procesów wytwarzania) zwykle nie jest możliwa. W tym kontekście bardzo istotny jest także dobór kadry zarządzającej i kadry realizującej zasadnicze procesy produkcyjne. Dobór kadry realizującej proces przygotowania inwestycji, jak również kadry bezpośrednio uczestniczącej w produkcji, powinien być poprzedzony pełną analizą ich potrzeb w zakresie kompetencji, jakie wymagane są na każdym odcinku podejmowanego zadania produkcyjnego, na każdym stanowisku. Chcąc podjąć taką decyzję, można i należy wprowadzić do modelu decyzyjnego więcej niż jedno kryterium takiego wyboru. Uwzględnia się wtedy zarówno kryteria deterministyczne (których wartości są określone dokładnie), statystyczne (jeżeli można, choćby w przybliżeniu, określić rozkłady ich wartości), a także subiektywne kryteria punktowe i rozmyte (za pomocą których eksperci dokonują zwykle oceny zarówno kryteriów optymalności, jak i wariantów rozwiązań, posługując się skalami punktowymi).

Zakłady produkcyjne, wytwarzające np. maszyny i urządzenia techniczne, działają w trudnych warunkach, muszą spełniać oczekiwania wymagającego nabywcy. Te nowe warunki działania oznaczają dla firm przemysłowych konieczność położenia nacisku na jakość, na zaspokajanie potrzeb nabywców oraz na nieustanne ulepszanie swojej działalności. Osiągnięcie i utrzymanie wysokiej jakości produkowanych wyrobów - różnorodnych i mających krótki cykl życia - przy jednoczesnym spełnieniu warunków ekonomicznego wytwarzania, decydują o utrzymaniu się firmy na rynku, o jej pozycji i rozwoju. Ciągły postęp powoduje, że zarówno w trakcie projektowania, jak i realizacji procesów wytwarzania wymaga się podejmowania możliwie najkorzystniejszych decyzji, warunkujących osiągnięcie pożądaných celów. Jednym z głównych środków umożliwiających osiągnięcie tych celów jest właśnie op-

tymalizacja zarówno realizacji samych procesów produkcyjnych, jak i samego doboru zasobów ludzkich jako bezpośrednich realizatorów tych zadań.

Na początku łańcucha decyzyjnego powstaje zasadniczy problem doboru kadr. Dobór kadr może opierać się na wyborze tzw. profesjonalisty, tj. osoby posiadającej wystarczające kompetencje aby postawione przed nim zadania wykonała właściwie i zrealizowała postawione przed nią zadania. Wybór tego profesjonalisty możliwy jest w oparciu o dwa zasadnicze założenia:

- profesjonalisty o rozległej wiedzy, o szerokich kompetencjach, charakteryzującej się możliwością podejmowania realizacji zadań z różnych obszarów produkcyjnych,
- profesjonalisty o wąskiej wiedzy, lecz wystarczającej do realizacji postawionych przed nią zadań.

Oczywiście wybór musi być podporządkowany przede wszystkim zadaniami, jakie mają być zrealizowane oraz wielkością produkcji, jaka ma być podjęta w przyszłości.

Szybki rozwój automatyzacji produkcji, połączony z wprowadzeniem techniki komputerowej, powoduje silne dążenie do sformalizowania w postaci algorytmów, sposobów postępowania w trakcie projektowania procesów produkcyjnych i procesów wytwarzania w szczególności. Przejawia się to w wyraźnej tendencji do opracowywania rozwiązań kompleksowych typu CAPP (*Computer Aided Process Planning - planowanie procesu wspomaganie komputerowo*) lub CAM (*Computer Aided Manufacturing - wytwarzanie wspomaganie komputerowo*)¹. Właśnie z tego punktu widzenia zasadne wydaje się dążenie do uzyskania pewnej „uniwersalności” lub też elastyczności w doborze kadr realizujących zadania produkcyjne.

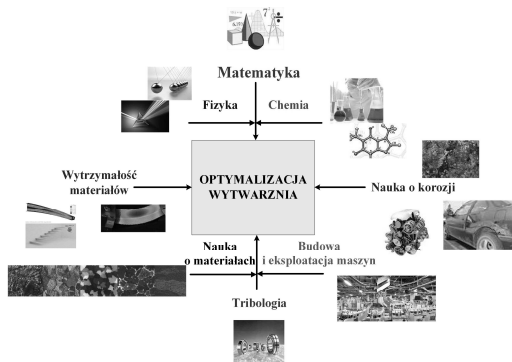
W optymalizacji działalności produkcyjnej szczególne miejsce zajmuje optymalizacja procesów wytwarzania. Pod tym pojęciem należy rozumieć zarówno optymalizację warunków obróbki (zwaną optymalizacją parametryczną), jak i struktury procesów (zwaną optymalizacją strukturalną). Optymalizacja warunków (parametrów) obróbki pełni funkcję komplementarną w stosunku do optymalizacji struktury. Te dwa zagadnienia są ze sobą sprzężone: optymalizacja struktury wymaga wcześniejszego nadania parametrom procesu wartości bliskich optymalnym, optymalizacja parametrów zaś wymaga wcześniejszego dokonania optymalizacji struktury. Rozwiązaniem powstającej sprzeczności jest postępowanie iteracyjne, w którym zwykle najpierw rozwiązuje się zadanie wyboru struktury procesu zbliżonej do optymalnej (przyjmując typowe wartości parametrów), a następnie przeprowadza się optymalizację parametrów. Kolejnym krokiem jest przejście do uściślenia wyboru struktury itd.²

Analiza możliwość realizacji jakiegokolwiek optymalizacji w procesach wytwórczych, wymaga znajomości wielu dziedzin nauki od matematyki, chemii, po wytrzymałość materia-

¹ A. Samek, J. Duda, *Elementy struktury sieciowego modelu dla zautomatyzowanego generowania procesów technologicznych*. Prace Naukowe ITBM Politechniki Wrocławskiej 36. Seria: Konferencja 13 nt. Komputerowe Wspomaganie Konstruowania Obrabiarek i Procesów Obróbki Skrawaniem CAD-CAM-CIM '88, Wrocław 1988; A. Samek., J. Duda, *Opis i systematyka zdarzeń w procesie technologicznym dla celów wspomaganego komputerowo projektowania*. Materiały na Konferencję Naukową nt. Podstawy Projektowania Procesów i Systemów Produkcyjnych. Monografia 150. Kraków 1993, ss. 185-200.

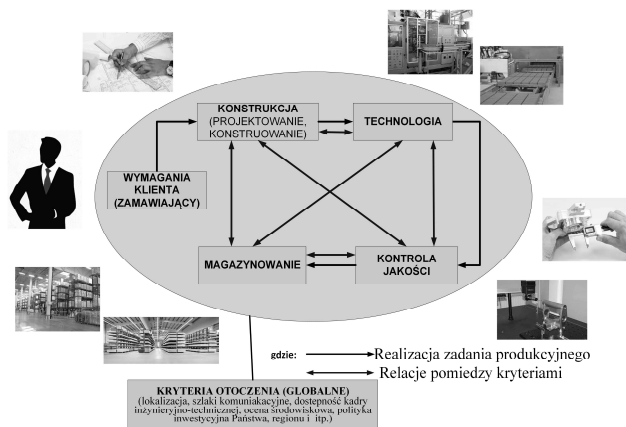
² J. Szadkowski, *Artificial Intelligence Approach to Structural and Parametrical Optimization of Multi-Tool-Machining Processes*. Gepgyartastechnologia (Feitigungstechnik), Budapest 1992b, 9-10; S. Szulc, *Struktura technologicznych procesów budowy maszyn*. Archiwum Budowy Maszyn 1962, 9, 1, ss. 87-112.

łów włącznie (rys. 1.), a co za tym idzie i kompetencje osób realizacyjnych te procesy muszą być szerokie.



Rys. 1. Znaczenie nauk podstawowych w optymalizacji wytwarzania w kontekście wyboru wiedzy pracownika-decydenta, bezpośredniego wykonawcy, profesjonalisty

Uzasadnieniem tego punktu widzenia jest fakt, iż procesy produkcyjne, w tym i procesy wytwarzania części maszyn, składają się z odrębnych, zamkniętych elementów (rys. 2.). Często wynika to z konieczności stopniowego nadawania częściom (przedmiotom) obrabianym ich ostatecznych właściwości. Konsekwencją tego jest stosowanie kolejno wielu odmiennych rodzajów i sposobów obróbki, odmiennych technologii przy odrębności parametrów poszczególnych procesów i występujących w nich operacji. Te warunki wytwarzania powodują, że charakterystyczną cechą omawianych procesów jest dyskretny charakter procesu, a kolejność stosowania poszczególnych rodzajów i sposobów obróbki, z uwagi na ich cel, nie jest obojętna³.

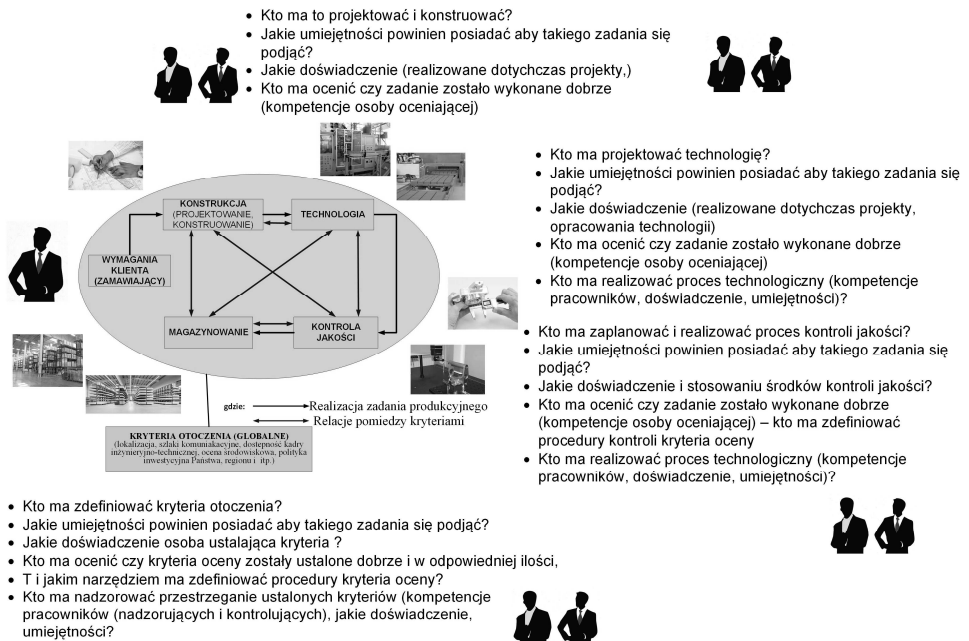


Rys. 2. Części składowe procesu produkcyjnego

W tym kontekście zasadnicze wydaje się pytanie – kto ma realizować i analizować te procesy.

³ J. Szadkowski, *op. cit.*

Na rysunku 3 przyporządkowane zostały podstawowe pytania, z jakimi potencjalny inwestor powinien się zmierzyć w celu osiągnięcia zamierzonego zadania produkcyjnego.



Rys. 3. Części składowe procesu produkcyjnego w ujęciu decyzyjnym

1. Optymalizacja wielokryterialna procesu

1.1. Charakterystyka optymalizacji wielokryterialnej

Optymalizacja wielokryterialna (wektorowa, wielowymiarowa, wielowskaźnikowa, polioptymalizacja) należy do intensywnie rozwijanych gałęzi projektowania optymalnego. Problem optymalizacji, w którym do oceny rozwiązania stosuje się kilka kryteriów, został po raz pierwszy sformułowany przez *Francisa Ysidro Edgewortha* w 1881 r. Koncepcję tę rozwinął włoski ekonomista *Vilfredo Pareto* (1906), od nazwiska którego wywodzą się często spotykane określenia „optimum w sensie Pareto”, „rozwiązanie Pareto - optymalne” itp. Rozwój tej gałęzi optymalizacji jest związany z naukami ekonomicznymi. Z nazwiskiem Pareto jest związana także znana zasada 20/80, mówiąca w skrócie o tym, że 20% pracy daje 80% rezultatów, natomiast 80% czasu daje 20% rezultatów⁴. *Optymalizacja wielokryterialna* wykorzystuje fakt, że do oceny konstrukcji formułuje się nadrzędne kryterium optymalizacyjne, będące zbiorem kryteriów cząstkowych. Zagadnienia takie są często spotykane w optymalnym projektowaniu konstrukcji, opartym na systemowej analizie problemu. Projektant bardzo często musi rozwiązać problem, w którym konstrukcja ma za zadanie spełnienie jednocześnie kilku,

⁴ V. Pareto, *Cours d'Economie*. Rouge, Lausanne 1896.

nierzadko konfliktowych (przeciwstawnych) kryteriów. Powstaje typowy problem decyzyjny, polegający na określeniu ważności poszczególnych kryteriów. Jedynym racjonalnym rozwiązaniem jest przyjęcie pewnego kompromisu. Projektant (decydent, profesjonalista) w procesie projektowania powinien swoje zamierzenia realizować jak najlepiej, czyli optymalnie. Cały proces projektowania może być traktowany jako **proces podejmowania decyzji**, np. o wyborze takiego a nie innego rozwiązania. W ten sposób staje się on decydentem w zakresie swoich uprawnień⁵. Ze względu na szerszy horyzont działania, który musi być stosowany w optymalizacji wielokryterialnej, zamiennie stosowanie pojęć projektant – decydent, rozwiązanie – decyzja jest jak najbardziej uzasadnione. W swojej działalności projektant powinien brać pod uwagę następujące założenia⁶:

- ma możliwość wyboru rozwiązania konstrukcyjnego (wariantu, decyzji) z pewnego zbioru rozwiązań (decyzji) dopuszczalnych,
- dysponuje stworzonym przez siebie lub narzuconym z góry systemem wartości pozwalającym na ocenę rozwiązań (decyzji),
- potrafi orzec, przynajmniej w stosunku do niektórych par rozwiązań, które z tych par uznaje za lepsze – które preferuje ze względu na przyjęty system wartości,
- potrafi uzasadnić i obronić satysfakcjonujący go wybór, w jego ocenie optymalny.

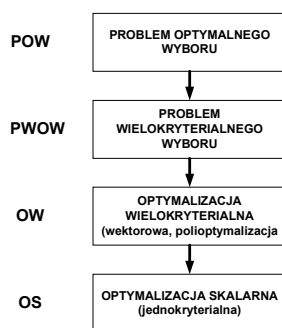
Opisana wyżej sytuacja jest nazywana w literaturze **Problemem Optymalnego Wyboru (POW)**⁷. Gdy przyjęty system wartości umożliwia sprecyzowanie kryteriów oceny rozwiązania, wówczas problemem staje się problem wielokryterialnego optymalnego wyboru (PWOW). Rozwiązanie problemu PWOW wymaga określenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych oraz zbioru ich ocen. A zatem wobec tak postawionego problemu kluczowe staje się także pytanie o kompetencje osób biorących udział w takim wyborze. Zadanie optymalizacji wielokryterialnej (OW) wymaga określenia wektorowej funkcji celu (relacji), za pomocą której zbiór rozwiązań dopuszczalnych będzie odwzorowany w zbiór ocen. Jeżeli funkcja celu będzie jednokryterialna (skalarna), wówczas mamy do czynienia z zadaniem optymalizacji skalarnej (OS). Strukturę problemów optymalizacji przedstawiono na rys. 3.1.⁸

⁵ G. Król, *Wielokryterialna optymalizacja parametrów skrawania w procesie dokładnego toczenia zahartowanej stali*. Praca doktorska, Politechnika Poznańska 1998; R. Lorek, *Optymalizacja wielokryterialna procesów wytwarzania rotorów przędzarek*. Rozprawa doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała 2008; S.H. Yeo, *A multipass optimization strategy for CNC lathe operations*, International Journal Production Economics 1995, 40, ss. 209-218.

⁶ M. Ostwald, *Współczesne problemy optymalizacji. Od lekcji natury do zastosowań w technice*, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Współczesne Problemy Techniki, Technika 2003, 3, s. 1-37.

⁷ A. Borkowski, S. Jendo, *Mathematical Programming*, [w:] M. Save, W. Prager (ed.), *Structural Optimization*, vol. 2, Plenum Press, New York and London 1990.

⁸ M. Ostwald *op. cit.*, s.1-3.

Rys. 3.1. Struktura problemów optymalizacji⁹

W procesie projektowania optymalnego, dotyczącego zarówno samego procesu, jak i optymalnego doboru kadry zarządzającej, w zależności od etapu, korzysta się z różnych metod optymalizacyjnych. W początkowych fazach, na etapie formułowania zadania i precyzowania wymagań, zadanie nie jest jeszcze dostatecznie precyzyjnie opisane, stąd konieczność stosowania POW i PWOW oraz szerokich kompetencji osób realizujących te zadania. Procedury POW i PWOW wywodzą się bezpośrednio z ekonomii i zarządzania. Podejmowanie decyzji występuje w sytuacji, gdy ma się do czynienia ze zjawiskami dynamicznymi, niemierzalnymi, słabo opisanymi, rozmytymi, gdy ogólnie rzecz biorąc brakuje informacji na temat zadania. Sytuacja decyzyjna charakteryzuje się różnorodnością kryteriów jej oceny, uwzględniającą nie tylko aspekty techniczne czy ekonomiczne, lecz również aspekty o charakterze systemowym. Ze względu na swoje właściwości matematyczny opis POW jest bardzo skomplikowany i z inżynierskiego punktu widzenia mało przydatny. Decydent (decydenci-profesjonalista) w celu dokonania optymalnego wyboru korzysta z innych technik wspomaganie decyzji (np. z list rankingowych). Po sformułowaniu problemu można już odejść od jego nieprecyzyjnego opisu i wykorzystać w dalszej działalności aparat matematyczny. OW i OS mogą być stosowane wówczas, gdy problem będzie możliwie kompleksowo opisany za pomocą aparatu matematycznego. Cechą charakterystyczną optymalizacji wielokryterialnej jest fakt otrzymywania pewnego zbioru rozwiązań optymalnych o różnym stopniu kompromisu (relacji) pomiędzy poszczególnymi kryteriami. Rozwiązania te otrzymuje się za pomocą różnych procedur optymalizacyjnych i ocenę mogą przeprowadzić tylko osoby o wysokich kwalifikacjach. W odróżnieniu od optymalizacji skalarnej (jednokryterialnej), gdzie otrzymane rozwiązanie jest jednoznacznie optymalne, projektant – profesjonalista (decydent) musi podjąć jeszcze jedną decyzję - które ze zbioru rozwiązań optymalnych należy uznać za najlepsze. Dla ułatwienia wyboru korzysta się z tzw. preferencji. Preferowanie pewnych rozwiązań polega na takim podejmowaniu decyzji, aby ze zbioru rozwiązań wybrać jedną z trzech możliwych sytuacji¹⁰:

1. wybrać jedno rozwiązanie i uznać je za najlepsze,
2. wybrać podzbiór rozwiązań ze zbioru rozwiązań optymalnych,
3. ustawić wszystkie rozwiązania w szereg od najlepszego do najgorszego, czyli utworzyć listę rankingową.

⁹ *Ibidem.*¹⁰ A. Borkowski, S. Jendo, *op. cit.*

Każda decyzja powstająca w wyniku działań różnych mechanizmów (czarna i biała skrzynka, szara skrzynka) jest pewnym procesem pociągającym za sobą wiele skutków. Podjęcie decyzji oznacza, że redukuje się pewien zakres swobody i wymusza działanie w określonym przez decyzję kierunku. Projektant, przyjmując system wartości, precyzuje również swoje preferencje, określa zakres kompromisu, jaki w jego ocenie może prowadzić do uzyskania najlepszych rozwiązań. Kompromis niezgodny z przyjętym systemem wartości nie prowadzi do rozwiązań optymalnych. Z powyższych rozważań wynika, że *optymalizacja wielokryterialna jest zagadnieniem bardziej złożonym niż optymalizacja jednokryterialna. Na ten stopień złożoności składają się nie tylko problemy matematyczne związane z uzyskaniem rozwiązań optymalnych, ale również problemy natury decyzyjnej* w zakresie wyboru przyjętego rozwiązania, jak i wyboru profesjonalisty (osoby) dokonującego tego wyboru¹¹.

W zagadnieniach technicznych trudności w podejmowaniu decyzji optymalnych rozwiązuje się za pomocą odpowiednich procedur, umożliwiających ocenę rozwiązań konstrukcyjnych z różnych, najczęściej przeciwstawnych punktów widzenia (na przykład wspomniane już listy rankingowe). W procesie projektowania dąży się do eliminowania sytuacji niejasnych, nie opisanych za pomocą reguł matematycznych. System wartości, będący odzwierciedleniem preferencji i planów decydenta (decydentów), musi być wyrażony za pomocą nadrzędnego kryterium optymalizacyjnego i związanego z nim zbioru kryteriów cząstkowych. Zadanie optymalizacji w takim ujęciu jest więc wielokryterialnym opisem rzeczywistości. Taki opis jest bogatszy i bliższy rzeczywistości niż ocena z jednego punktu widzenia (optymalizacja skalar-
na).

2. Wybrane metody analizy wielokryterialnej

Jednym z podstawowych kryterium podziału metod optymalizacji wielokryterialnej jest typ wykorzystywanego modelu matematycznego. Wyróżniamy tu następujące grupy:

- metody deterministyczne, gdzie główny czynnik to brak elementu losowości,
- w procesie obliczeń,
- metody niedeterministyczne (stochastyczne), gdzie element losowości to kluczowy czynnik metody.

Możemy także wyróżnić dwie płaszczyzny kryteriów podziału¹²:

- wielokryterialne algorytmy ewolucyjne,
- wielokryterialne metody rankingowe.

2.1. Wielokryterialne metody rankingowe

Wielokryterialne metody rankingowe to metody służące rozwiązywaniu wielokryterialnych problemów decyzyjnych, w tym i wyboru kompetencji, jakie powinna mieć kadra realizująca te procesy. W metodach tych zbior danych zawiera¹³:

¹¹ A. Brandt (red.), *Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.

¹² M. Ostwald, *op. cit.*, s. 3.

¹³ *Ibidem*.

- zbiór badanych obiektów, z których należy wybrać najlepszy (spis profesjonalistów o oczekiwanych kompetencjach),
- zbiór kryteriów decyzyjnych,
- wektor współczynników wagowych, przypisany kryteriom,
- macierz decyzyjną, zawierającą wartości uzyskiwane przez badane obiekty w ramach każdego z założonych kryteriów.

Na podstawie tych danych tworzony jest końcowy wektor rankingowy, zawierający wartości z przedziału $(0,1)$, przypisywane każdemu z badanych obiektów. Za najlepszy z obiektów, według założonego zbioru kryteriów, uznawany jest ten, który uzyska największą wartość współczynnika rankingowego. Metody rankingowe, służące do podejmowania decyzji wielokryterialnej, reprezentujące główne nurty rozwiązań w tej dziedzinie to¹⁴: *Simple Additive Weighting (SAW)*, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, *Analytical Hierarchy Process (AHP)*.

Spośród bardzo wielu metod optymalizacji wielokryterialnej, najczęściej wykorzystywanymi metodami, które posługują się kryteriami o charakterze deterministycznym, wyróżnić należy¹⁵:

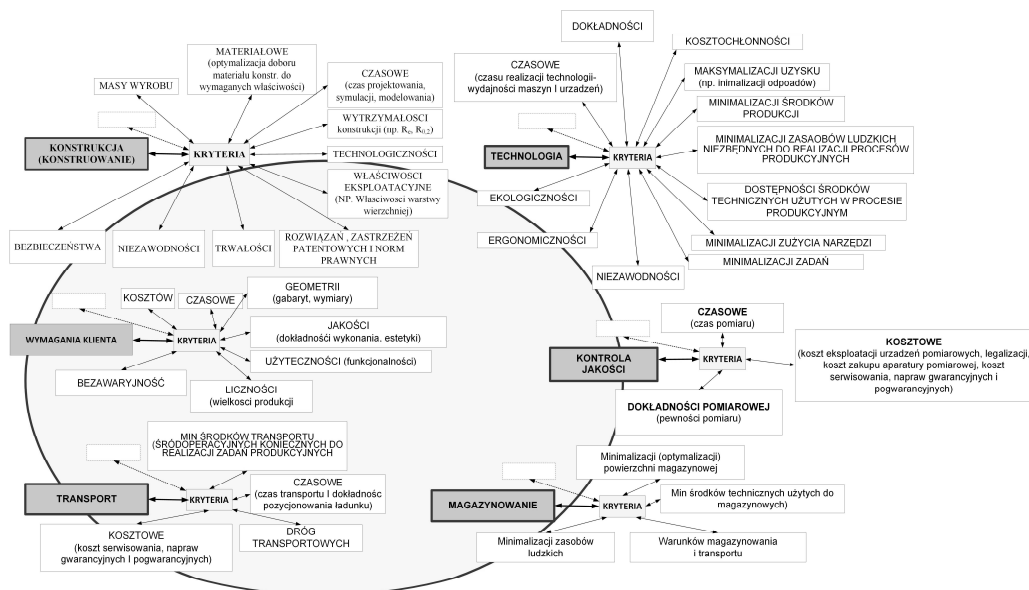
- metodę ważonych kryteriów (*Weighted Objectives Method*),
- metodę optymalizacji hierarchicznej (*Hierarchical Optimization Method*),
- metodę ograniczonych kryteriów (*Trade-Off Method*),
- metodę kryterium globalnego (*Global Criterion Method*),
- metodę funkcji odległości (*Method of Distance Functions*),
- metodę mini-max (*Min-Max Method*),
- metodę programowania celów (*Goal Programming Method*).

2.2. Kryteria optymalizacji wielokryterialnej

Każdy proces wytwarzania wyrobu powinien stanowić sformalizowany przez profesjonalistów (decydentów) kompromis między dążeniem do zapewnienia żądanej jakości tego wyrobu, w tym zwiększenia jego niezawodności, a dążeniem do zmniejszenia kosztów materiałów, kosztów wykonania i eksploatacji. Znalezienie najkorzystniejszego wariantu procesu wytwarzania jest możliwe jedynie po przeprowadzeniu właściwie przygotowanej analizy optymalizacyjnej i kryteriów, według których ta optymalizacja jest możliwa do przeprowadzenia (rys. 5).

¹⁴ *Ibidem*.

¹⁵ R. Knosala, W. Pedrycz, *Komputerowy system wspomagający proces oceny rozwiązań konstrukcyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1012, Mechanika 1987a, 86, ss. 143-163; W. Tarnowski, *Model procesu wyboru w projektowaniu technicznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 787, Automatyka 72, Gliwice 1984.



Rys. 5. Schemat analizy optymalizacyjnej i kryteriów optymalizacji

A zatem i tu powstaje pytanie, kto i z jakimi kompetencjami może i powinien przeprowadzić taką optymalizację i wg jakich kryteriów. Wynik optymalizacji w dużym stopniu zależy od sformułowania zagadnienia, przy czym szczególne znaczenie ma wybór kryteriów, według których będą oceniane poszczególne warianty procesu. W optymalizacji procesów wytwarzania najczęściej przyjmowanymi kryteriami są¹⁶:

- kryteria użytkowe (funkcjonalne, estetyczne) – zdefiniowane przez potencjalnego klienta;
- kryteria techniczne (ogólnotechniczne, wytwórcze, materiałowe) – sformułowane przez np. konstruktorów, technologów;
- kryteria ekonomiczne (koszty produkcji, koszty eksploatacji) – sformułowane najczęściej przez kierownictwo firmy.

Od wybranej technologii wykonania w znacznym stopniu zależy zapewnienie funkcjonalności i estetyki wyrobu poprzez nadanie mu pożądaných właściwości jakości wytwórczej i użytkowej, jak: dokładność kształtowo-wymiarowa, struktura stereometryczna powierzchni (SGP 3D), współczynnik tarcia, właściwości mechaniczne, przewodnictwo cieplne, przewodnictwo elektryczne, wygląd zewnętrzny, masa. Zapewnienie wymaganej jakości użytkowej wyrobu jest podstawowym warunkiem, który musi być spełniony przy wyborze wariantu procesu wytwarzania. *Kryteria ogólnotechniczne* powinny uwzględniać wielkość produkcji, tj. całkowitą liczbę wyrobów do wyprodukowania przez cały okres produkcji danego wyrobu, oraz okres produkcji (czyli przewidywana liczba lat produkowania wyrobu bez jego gruntownej modernizacji, termin zakończenia produkcji itp.). *Kryteria wytwórcze* obejmują stan wy-

¹⁶ A. Osyczka, *Optymalizacja wielokryterialna*. Sympozjum Inauguracyjne Szkoły Podstaw Optymalizacji Procesów Technologicznych i Systemów Produkcyjnych. PAN, Sekcja Podstaw Technologii KBM. TNOiK, Biel-sko-Biała ss. 37-48.

posażenia zakładu w urządzenia produkcyjne, oprzyrządowanie oraz stan zaplecza naukowo-technicznego i załogę. *Kryterium materiałowe* powinno uwzględniać wybór rodzaju półfabrykatu, dokładność wymiaru i kształtu półfabrykatu, jego właściwości mechaniczne oraz deficytowość materiałów. *Kryteria ekonomiczne* to przede wszystkim koszt własny wyrobu, który w wielu przypadkach jest całkowicie wystarczający do porównania wariantów procesu wytwarzania. Gdy rozpatrywane warianty procesu wytwarzania różnią się od siebie tylko jednym składnikiem kosztów, np. zużyciem materiału, ceną robocizny, to do wyboru właściwego wariantu wystarczy ustalić i porównać tylko ten składnik kosztów, niezależnie od tego, czy zawiera się on w kosztach bezpośrednich, czy pośrednich. Do porównania i wyboru najlepszego (optymalnego) wariantu procesu wytwarzania można również skorzystać z wielu wskaźników techniczno-ekonomicznych, rejestrowanych przez przedsiębiorstwo lub specjalnie wyliczanych, jak: wskaźnik kosztu jednostkowego, pracochłonności, wykorzystania materiału, oprzyrządowania, wykorzystania czasu pracy obrabiarek i urządzeń. Teoretycznie wybór najlepszego wariantu procesu wytwarzania wydaje się łatwy. Wystarczy tylko określić koszt własny wyrobu, będący sumą kosztu wytwarzania oraz kosztu eksploatacji, i problem optymalizacji sprowadzić do zagadnienia jednokryterialnego. Powstaje jednak pytanie, jak tego dokonać w praktyce, na etapie projektowania procesu wytwarzania, w szczególności podczas uruchamiania produkcji nowego wyrobu, kiedy precyzyjne obliczenie (wyznaczenie) kosztu wytwarzania, a w szczególności kosztu eksploatacji, jest bardzo trudne, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwe. Do jego określenia są bowiem niezbędne informacje, które można uzyskać dopiero w wyniku wykonania serii próbnej oraz przeprowadzenia czasochłonnych badań eksploatacyjnych. Dlatego zamiast jednego kryterium w postaci kosztu wyrobu do oceny wariantów przyjęto wiele (dwa i więcej) kryteriów, które są bardziej dostępne na etapie projektowania, i problem optymalizacji sprowadzono do zagadnienia wielokryterialnego. Te kryteria oceny powinny być od siebie niezależne, tak aby można było oddzielnie określić wpływ każdego z nich. Warunek ten w praktyce trudno jest w pełni spełnić i dlatego mówi się raczej o „wymaganej niezależności”¹⁷.

W najogólniejszym przypadku do oceny wariantów procesów wytwarzania można, oprócz kryteriów o charakterze deterministycznym (sprecyzowanym, ostrym) i probabilistycznym (które w pracy¹⁸ zostały określone jako kryteria probabilistyczno-statystyczne), stosować kryteria o charakterze rozmytym (nieostrym)¹⁹. Na etapie projektowania procesów wytwarzania części maszyn najczęściej nie ma możliwości dokładnego określenia wartości kryteriów de-

¹⁷ J. Kacprzyk, *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, PWN, Warszawa 1986.

¹⁸ J. Szwabowski, *Poliptymalizacja parametryczna wielozabiegowych operacji toczenia zarysów złożonych*. Prace Naukowe 504, Politechnika Szczecińska 1993.

¹⁹ A. Breiing, R. Knosala, *Bewerten technischen Systeme (Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen)*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1997; J. Kacprzyk *op. cit.*; R. Knosala, *Methoden zur Bewertung von Bauelementen als Voraussetzung für die Entwicklung von Baukastensystemen*. Technische Universität Dresden. Dissertation B. 1989; M. Ostwald *op. cit.*; R. Knosala, S. Plonka, *Objektivierung der Bewertung bei technischer Produktionsvorbereitung*. Proceedings of International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Zakopane 1994, ss. 51-77; R. R. Yager, *Fuzzy Decision Making including Unequal Objectives*. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1, ss. 87-95; R.R. Yager, *Multiple Objective Decision - Machining Using Fuzzy Sets*. *International Journal on Man - Machines Studies*, 1977, 9, ss. 375-382.

terministycznych. W takich przypadkach do oceny wariantów procesów należy stosować subiektywne kryteria punktowe²⁰.

3. Wybrane problemy optymalizacji wielokryterialnej

Pierwszą wzmiankę o optymalizacji wielokryterialnej zawiera praca²¹. Dopiero po upływie ponad pół wieku zagadnienie to podjęto ponownie w pracach²². Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej ma swoje miejsce także w projektowaniu konstrukcji na podstawie minimum masy oraz minimum energii sprężystej lub minimum masy oraz minimum przemieszczeń przedstawiono w pracach²³. Optymalizację wielokryterialną stosuje się także do optymalizacji struktur przestrzennych stanowiących konstrukcję nośną radioteleskopów na podstawie kryteriów minimum masy oraz minimum odchyłeń powierzchni odkształconej od powierzchni początkowej w różnych stanach obciążenia. W przeważającej większości ww. prac zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu konstrukcji są rozwiązywane w trzech etapach²⁴:

- wyznaczanie zbioru kompromisów (optimum w sensie Pareto),
- wybór rozwiązania najlepszego (optymalnego) ze zbioru kompromisów,
- w analizie optymalizacji wielokryterialnej proponuje się bardzo istotny (jeśli nie najważniejszy) – wybór kompetencji osób realizujących taką optymalizację.

Jako kryteria oceny do wyznaczania zbioru kompromisów są przede wszystkim stosowane kryteria o charakterze deterministycznym, przy czym wszystkie te kryteria traktuje się jako równie ważne. Natomiast wybór rozwiązania najlepszego (optymalnego) ze zbioru kompromisów odbywa się z wykorzystaniem dodatkowego (najczęściej nowego) kryterium.

²⁰ S. Płonka, *Metoda oceny i wyboru optymalnej struktury procesu technologicznego*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. Projektowanie Procesów Technologicznych TPP'98. Poznań-Czemiejewo 1998b., ss. 153-162; S. Płonka, *Model optymalizacji wielokryterialnej struktury procesów technologicznych*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 1994b, 18, 1, ss. 25-60; S. Płonka, *Metody oceny i wyboru optymalnej struktury procesu technologicznego*. Rozprawy Naukowe 48. Budowa i Eksploatacja Maszyn 31. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Filia w Bielsku-Białej, 1998a, s. 186; J. Szwabowski, *Poliptymalizacja parametryczna wielozabiegowych operacji toczenia zarysów złożonych*. Prace Naukowe 504, Politechnika Szczecińska 1993; J. Szwabowski, *Zastosowanie kryterium minimalnej ceny jednostkowej w poliptymalizacji parametrycznej wielozabiegowych operacji tokarskich*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń 1994, 18, 3, ss. 57-77.

²¹ V. Pareto, *op. cit.*

²² H.W. Kuhn, A.W. Tucker, *Nonlinear Programming*. Proceedings Berkeley Symposium Mathematical Statistical and Probabilistic, University of California Press. Berkeley, California 1951; V. Pareto, *op. cit.*; J. Szadkowski, *Replacement Strategies for Multi-Tool Machining*. Buletinul Stiintific al Universitatii Tehnice Din. Cluj-Napoca 1993b.

²³ H. Baier, *Über Algorithmen zur Ermittlung und Charakterisierung Pareto optimaler Lösungen bei Entwingenaufgaben elastischer Tragwerke*. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 1977, 57; H. Baier, *Mathematische Programmierung zur Tragwerken insbesondere bei mehrfachen Zielen*. Dissertation D17, Darmstadt 1978; G. Debreu, *Theory of Value*. John Wiley, New York 1959; W. Stadler, *Preference Optimality and Applications of Pareto Optimality, in Multicriteria Decision Making* (eds G. Leitman, A. Marzello). CISM Courses and Lectures, 211. Springer-Verlag, Wien-New York, 1975; W. Stadler, *Natural Structural Shapes of Shallow Arches*. Journal Applied Mechanical 1977, 44, 2; W. Stadler, *Natural Structural Shapes (The Static Case)*. Journal Mechanics Applied: J Mathematics 1978, 31, 2.

²⁴ M. Ostwald, *op. cit.*, s. 1-3; S. Płonka, *op. cit.*; J. Szadkowski, *op. cit.*

4. Wnioski

Wielowariantowe projektowanie procesów wytwarzania, zwłaszcza nowych wyrobów, jest realizowane często przy braku pełnej informacji o wyrobach (np. jakość wyrobu, wymagania klienta są pobieżne i mało precyzyjne). Brak tej informacji oraz ograniczone środki finansowe, niezbędne do realizacji zadania produkcyjnego, a także brak informacji o konieczności zabezpieczenia procesu produkcyjnego przez zapewnienie koniecznej liczby pracowników o różnych kompetencjach powodują, że do określania optymalnego wariantu struktury procesu dogodniej jest uwzględnić kryteria oceny wyznaczone w sposób bardzo przybliżony. W bardzo wielu przypadkach do ich określenia potrzebna i wymagana jest wiedza ekspertów z wybranych dziedzin. Pomocą w tych przypadkach mogą być subiektywne kryteria punktowe lub subiektywne kryteria względne. Wybór wariantu optymalnego, ze względu na wyżej wymienione kryteria, odbywa się z zastosowaniem np. metody Yagera, która umożliwiła uszeregowanie ocenianych wariantów od najlepszego do najgorszego, ze względu na przyjęte kryteria mające różną ważność (wagę). Ważność kryteriów jest oceniana przez ekspertów-profesjonalistów poprzez porównywanie kolejnych par kryteriów z zastosowaniem np. macierzy. Stosowanie optymalizacji wielokryterialnej struktury procesów wytwarzania oraz parametrów operacji wytwórczych wybranych części maszyn, pozwalają na sformułowanie wniosków ogólnych o charakterze poznawczym:

- wielokryterialność oceny wariantów procesów wytwarzania stała się podstawowym środkiem uwzględniania złożonej różnorodności wymagań stawianych procesom obróbki,
- wspomaganie komputerowe w zakresie projektowania optymalnych procesów wytwarzania musi umożliwiać optymalizację wielokryterialną uwzględniającą różne kryteria, najczęściej subiektywne kryteria punktowe lub względne - w przypadku projektowania procesów nowych wyrobów oraz kryteria deterministyczne - w przypadku projektowania procesów wyrobów podobnych do już wytwarzanych,
- kryteria optymalizacji, traktowane często w modelach konwencjonalnych jako deterministyczne, np. koszt, w fazie projektowania procesu muszą być niejednokrotnie traktowane jako niedeterministyczne, a więc np. jako subiektywne oceny punktowe lub subiektywne oceny względne. Jest to spowodowane brakiem informacji we wczesnych stadiach powstawania projektu procesu wytwarzania nowych części maszyn,
- kryteria optymalizacji stosowane do oceny powinny być niezależne, a ich liczba, w przypadku określania zbioru rozwiązań niezdominowanych (Pareto-optymalnych), nie powinna przekraczać trzech, co jest korzystne ze względu na możliwość otrzymania stosunkowo mało liczego zbioru Pareto,
- optymalizacja wielokryterialna struktury procesu wytwarzania przebiega najlepiej, jeżeli ma charakter procedury jednoetapowej, np. metoda Yagera lub jej modyfikacje,
- optymalizacja wielokryterialna parametrów operacji i zabiegów daje na ogół dobre wyniki, jeżeli ma charakter procedury dwuetapowej: określenie zbioru rozwiązań niezdominowanych (Pareto-optymalnych), a następnie, w przypadku niejednoelementowego zbioru Pareto, wybór rozwiązania najlepszego z tego zbioru, ze względu na dodatkowe, najczęściej nowe kryterium,

- efekty praktyczne z zastosowania optymalizacji wielokryterialnej zależą przede wszystkim od umiejętnego doboru kryteriów ocen (kryteriów optymalizacji) na poszczególnych etapach postępowania optymalizacyjnego oraz lub przede wszystkim od doboru specjalistów-profesjonalistów, ludzi bezpośrednio zaangażowanych w realizację procesu produkcyjnego o określonych kwalifikacjach niezbędnych do realizacji projektu na każdym etapie jego realizacji.

Bibliografia

- Baier H., *Über Algorithmen zur Ermittlung und Charakterisierung Pareto optimaler Lösungen bei Entwindenaufgaben elastischer Tragwerke*. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 1977, 57.
- Baier H., *Mathematische Programmierung zur Tragwerken insbesondere bei mehrfachen Zielen*. Dissertation D17, Darmstadt 1978.
- Borkowski A., Jendo S., *Mathematical Programming*, w: Save M., Prager W. (ed.), *Structural Optimization*, vol. 2, Plenum Press, New York and London 1990.
- Brandt A. (red.), *Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1977.
- Breiting A., Knosala R., *Bewerten technischer Systeme (Theoretische und methodische Grundlagen bewertungs-technischer Entscheidungshilfen)*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1997.
- Debreu G., *Theory of Value*. John Wiley, New York 1959.
- Jendo S., Marks W., *O optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji*. Archiwum Inżynierii Lądowej 1984a, 30, 1.
- Kacprzyk J., *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*. PWN, Warszawa 1986.
- Knosala R., *Methoden zur Bewertung von Bauelementen als Voraussetzung für die Entwicklung von Baukastensystemen*. Dissertation B., Technische Universität Dresden 1989.
- Knosala R., *Objektivierung des Bewertungsprozesses beim Konstruieren*. Konstruktion 1991, 43.
- Knosala R., Pedrycz W., *Komputerowy system wspomagający proces oceny rozwiązań konstrukcyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1012, Mechanika 1987, 86.
- Knosala R., Plonka S., *Objektivierung der Bewertung bei technischer Produktionsvorbereitung*. Proceedings of International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Zakopane 1994.
- Król G., *Wielokryterialna optymalizacja parametrów skrawania w procesie dokładnego toczenia zahartowanej stali*. Praca doktorska. Politechnika Poznańska 1998.
- Kuhn H.W., Tucker A.W. *Nonlinear Programming*. Proceedings Berkeley Symposium Mathematical Statistic and Probabilistic, University of California Press. Berkeley, California 1951.
- Lorek R., *Optymalizacja wielokryterialna procesów wytwarzania rotorów przędzarek*. Rozprawa doktorska. Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała 2008.
- Ostwald M., *Współczesne problemy optymalizacji. Od lekcji natury do zastosowań w technice*, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Współczesne Problemy Techniki, Technika 2003, 3.
- Osyczka A., *Optymalizacja wielokryterialna*. Sympozjum Inauguracyjne Szkoły Podstaw M Optymalizacji Procesów Technologicznych i Systemów Produkcyjnych. PAN, Sekcja Podstaw Technologii KBM. TNOiK, Bielsko-Biała 1986.
- Pareto V., *Cours d'Economie*. Rouge, Lausanne 1896.
- Plonka S., *Metoda oceny i wyboru optymalnej struktury procesu technologicznego*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. Projektowanie Procesów Technologicznych TPP'98. Poznań-Czemiejewo 1998b.
- Plonka S., *Model optymalizacji wielokryterialnej struktury procesów technologicznych*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń 1994b, 18, 1.
- Plonka S., *Metody oceny i wyboru optymalnej struktury procesu technologicznego*. Rozprawy Naukowe 48. Budowa i Eksploatacja Maszyn 31. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Filia w Bielsku-Białej 1998a.
- Samek A., Duda J., *Elementy struktury sieciowego modelu dla zautomatyzowanego generowania procesów technologicznych*. Prace Naukowe ITBM Politechniki Wrocławskiej 36. Seria: Konferencja 13 nt. Komputerowe Wspomaganie Konstruowania Obrabiarek i Procesów Obróbki Skrawaniem CAD-CAM-CIM '88. Wrocław 1988.
- Samek A., Duda J., *Opis i systematyka zdarzeń w procesie technologicznym dla celów wspomaganego komputerowo projektowania*. Materiały na Konferencję Naukową nt. Podstawy Projektowania Procesów i Systemów Produkcyjnych, Monografia 150, Kraków 1993.

- Saravanan R., Asokan P., Sachidanandam M., *Comparative Analysis of Conventional and Non-Conventional Optimization Techniques for CNC Turning Process*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17, 7.
- Stadler W., *Preference Optimality and Applications of Pareto Optimality, in Multicriteria Decision Making* (eds G. Leitman, A. Marzello). *CISM Courses and Lectures, 211*. Springer-Verlag, Wien-New York 1975.
- Stadler W., *Natural Structural Shapes of Shallow Arches*, Journal Applied Mechanical 1977, 44, 2.
- Stadler W., *Natural Structural Shapes (The Static Case)*, Journal Mechanics Applied: J Mathematics 1978, 31, 2.
- Stadler W., *Preference Optimality in Multicriteria Control and Programming Problems*. Journal of Nonlinear Analysis Theory, Methods and Applications, 1980, 4, 1.
- Szadkowski J., *Artificial Intelligence Approach to Structural and Parametrical Optimization of Multi-Tool-Machining Processes*. Gepgyartastechnologia (Feitigungstechnik) Budapest 1992b, 9-10.
- Szadkowski J., *Replacement Strategies for Multi-Tool Machining*. Buletinul Stiintific al Universitatii Tehnice Din Cluj-Napoca 1993b.
- Szulc S., *Struktura technologicznych procesów budowy maszyn*. Archiwum Budowy Maszyn 1962, 9, 1.
- Szwabowski J., *Poliptymalizacja parametryczna wielozabiegowych operacji toczenia zarysów złożonych*. Prace Naukowe 504, Politechnika Szczecińska 1993.
- Szwabowski J., *Zastosowanie kryterium minimalnej ceny jednostkowej w poliptymalizacji parametrycznej wielozabiegowych operacji tokarskich*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń 1994, 18, 3.
- Tarnowski W., *Model procesu wyboru w projektowaniu technicznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 787, Automatyka 1984, 72.
- Yager R.R., *Fuzzy Decision Making including Unequal Objectives*. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1.
- Yager R.R., *Multiple Objective Decision - Machining Using Fuzzy Sets*, International Journal on Man - Machines Studies 1977, 9.
- Yeo S.H., *A multipass optimization strategy for CNC lathe operations*, International Journal Production Economics, 1995, 40.