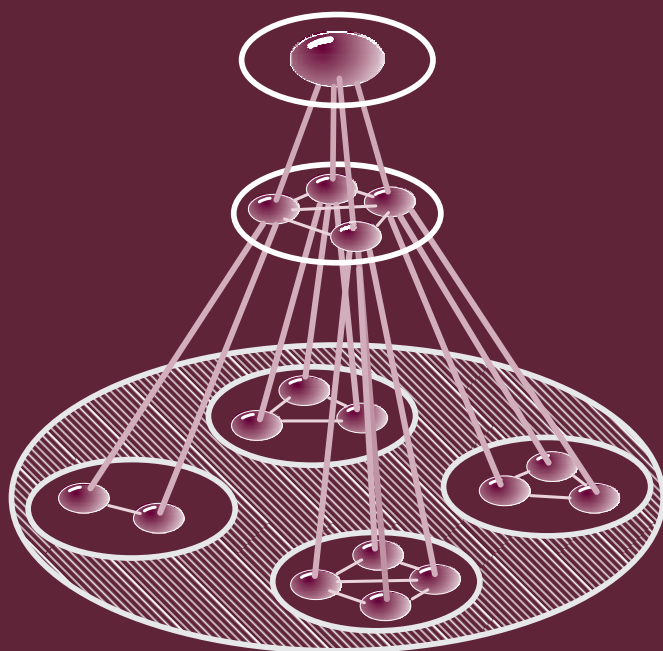


Ludmiła Zawadzka

**WSPÓŁCZESNE PROBLEMY
I KIERUNKI ROZWOJU
ELASTYCZNYCH
SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH**



Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

Ludmiła Zawadzka

**WSPÓŁCZESNE PROBLEMY
I KIERUNKI ROZWOJU
ELASTYCZNYCH
SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH**

Gdańsk 2007

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Romuald Szymkiewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Janusz T. Cieśliński

RECENZENCI

Zdzisław Jasiński

Juliusz Kulikowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Wydawnictwa PG można nabywać w księgarni PG (Gmach Główny)
i zamawiać faksem, pocztą elektroniczną lub listownie pod adresem:
Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–952 Gdańsk, tel./fax 058 347 16 18
e-mail: wydaw@pg.gda.pl, www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG

© Copyright by
Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk 2007

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–182–4

Spis treści

Wykaz skrótów	5
Wprowadzenie	7
1. WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH	9
1.1. Przesłanki rozwoju ESP	9
1.2. Podstawowe cechy ESP	12
1.3. Czynniki elastyczności systemów produkcyjnych	14
1.4. Struktura funkcjonalna ESP	16
1.5. Model komputerowo zintegrowanego systemu wytwórczego – KZSW	18
1.6. Metodologia projektowania elastycznych systemów sterowania przepływem produkcji (ESS-PP)	23
1.6.1. Podstawowe etapy projektowania komputerowo wspomaganych systemów produkcyjnych	24
1.6.2. Podstawowe zadania metodologiczne oraz kryteria projektowania ESS-PP	25
1.6.3. Ilościowe wskaźniki elastyczności	30
1.7. Model ESS-PP wyrobów złożonych	38
1.7.1. Sformułowanie problemu	38
1.7.2. Struktura funkcjonalna elastycznego systemu sterowania przepływem produkcji i założenia systemowe	39
2. KLASYFIKACJA PROBLEMÓW ESP W BADANIACH OPERACYJNYCH ORAZ METODY ICH ROZWIĄZYWANIA	45
2.1. Problemy projektowania ESP w badaniach operacyjnych	46
2.2. Problemy planowania	48
2.3. Problemy szeregowania i sterowania	50
2.4. Przegląd wybranych metod heurystycznych oraz metod inteligencji obliczeniowej rozwiązywania problemów harmonogramowania w ESP	52
2.4.1. Metody heurystyczne	52
2.4.1.1. System dyspozytorski tworzący harmonogramy bez opóźnień	52
2.4.1.2. Procedura wspinania na szczyt	53
2.4.1.3. Symulowane wyżarzanie	54
2.4.2. Metody inteligencji obliczeniowej	55
2.4.2.1. Algorytmy ewolucyjne	55
2.4.2.2. Sztuczne sieci neuronowe	57
2.4.3. Implementacja algorytmów	59
2.4.3.1. System dyspozytorski	61
2.4.3.2. Procedura wspinania na szczyt	62
2.4.3.3. Symulowane wyżarzanie	63
2.4.3.4. Algorytm ewolucyjny	63
2.4.3.5. Algorytm hybrydowy	66
2.4.4. Analiza porównawcza algorytmów	68
2.4.5. Podsumowanie	70

3. TECHNOLOGIE INFORMATYCZNE W ESP	72
3.1. Znaczenie technologii informatycznej w ESP	72
3.1.1. System informacyjny	72
3.2. Wymogi dla technologii informatycznych ESP	74
3.2.1. Integracja informacyjna ESP	74
3.2.2. Elastyczność informacyjna ESP	75
3.2.3. Szczegółowe wymagania dla technologii informatycznych ESP	77
3.2.4. Organizacja projektu informatycznego	78
3.2.4.1. Polityka personalna	80
3.2.4.2. Efektywność wdrażania systemu informatycznego ESP	81
3.2.5. Składniki technologii informatycznej ESP	86
3.2.5.1. Bazy danych ESP	87
3.2.5.2. Topologia konfiguracji sprzętowej	91
3.2.6. Perspektywy rozwoju technologii informatycznych ESP	93
4. KIERUNKI ROZWOJU INTELIGENTNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH	95
4.1. Wprowadzenie	95
4.2. Inteligentne systemy produkcyjne	96
4.2.1. Holonowe systemy produkcyjne	97
4.2.2. Bioniczne systemy produkcyjne	99
4.3. Technologie agentowe	102
4.3.1. Projekt HTS	103
4.4. Podsumowanie	105
Bibliografia	106

Wykaz skrótów

- BDT – bank danych technologicznych
- BMS – bioniczne systemy produkcyjne
- DDC – układ bezpośredniego sterowania cyfrowego (ang. DDC – *Direct Digital Control*)
- DSC – układ sterowania nadrzędnego (ang. DSC – *Digital Supervisor Control*)
- DSP – dyskretny system produkcyjny
- ESM – elastyczny system montażowy (ang. FAS – *Flexible Assembly System*)
- ESP – elastyczny system produkcyjny (ang. FMS – *Flexible Manufacturing Systems*)
- FSP – fraktalne systemy produkcyjne
- ESS-PP – elastyczny system sterowania przepływem produkcji
- EST – elastyczna stacja tokarska
- ESW – elastyczny system wytwarzania
- ESZ – elastyczny system zarządzania
- HMS – holonowe systemy produkcyjne
- ISP – inteligentne systemy produkcyjne
- IT – informatyczna technologia
- KMK – klasyczny model kolejek
- KSC – komputerowe sterowanie cyfrowe (ang. CNC – *Computer Numerical Control*)
- KUA – komputerowy układ automatyki
- KWA – komputerowo wspomagana administracja (ang. CAA – *Computer Aided Administration*)
- KWK – komputerowo wspomagane konstruowanie (ang. CAE – *Computer Aided Engineering*)
- KWKJ – komputerowo wspomagana kontrola jakości (ang. CAQA – *Computer Aided Quality Assurance*)
- KWP – komputerowo wspomagane projektowanie (ang. CAD – *Computer Aided Design*)
- KWPP – komputerowo wspomagane planowanie produkcji (ang. CAP – *Computer Aided Planing*)
- KWW – komputerowo wspomagane wytwarzanie (ang. CAM – *Computer Aided Manufacturing*)
- KZSW – komputerowo zintegrowany system wytwórczy
- KZW – komputerowo zintegrowane wytwarzanie (ang. CIM – *Computer Integrated Manufacturing*)
- LSK – lokalna sieć komputerowa (ang. LAN – *Local Area Network*)
- PPiS – planowanie produkcji i sterowanie (ang. PPS – *Production Planing Systems*)
- PT – protokół techniczny (ang. TOP – *Technical Office Protocol*)
- PZW – protokół zautomatyzowanego wytwarzania (ang. MAP – *Manufacturing Automation Protocol*)
- SAGW – samoregulujące się automatyczne gniazda wytwórcze
- SASW – samoprzekształcające się automatyczne systemy wytwórcze
- SNB – sterowanie numeryczne bezpośrednie (ang. DNC – *Direct Numerical Control*)
- SPD – system pobierania danych (ang. DAS – *Data Acquisition System*)
- SZBD – system zarządzania bankiem danych
- SZBDT – system zarządzania bankiem danych technologicznych
- USO – urządzenia sprzęgające z obiektem
- UWW – urządzenia wejścia/wyjścia

Wprowadzenie

Przedstawione opracowanie monograficzne poświęcone jest współczesnej problematyce elastycznych systemów produkcyjnych, a w szczególności ich zagadnieniom sterowania i wytwarzania. Zawarto w nim także charakterystykę najbardziej zaawansowanych technologii informatycznych; dokonano klasyfikacji ich metod oraz podstawowych problemów metodologicznych ich projektowania w zakresie planowania, sterowania i wytwarzania. Praca obejmuje również ilościowe metody wspomaganie decyzji projektowych w zakresie sterowania oraz możliwości stosowania technologii bionicznych w elastycznej produkcji dla tworzenia inteligentnych systemów produkcyjnych.

Projektowanie elastycznych systemów produkcyjnych cieszy się nadal niesłabnącym zainteresowaniem zarówno w kraju, jak i na świecie, i jest obecnie jednym z podstawowych kierunków prac badawczych o fundamentalnym znaczeniu w nauce o inżynierii i zarządzaniu produkcją.

Prawdopodobieństwo utrzymania się współczesnego przedsiębiorstwa na rynku w dużym stopniu zależy od poziomu realizowanej w nim strategii konkurencyjności. Wymaga to zmiany wizerunku i strategii rynkowej wielu firm i instytucji. Potrzeba zmiany paradygmatu widzenia dotyczy projektowania i funkcjonowania systemów produkcji. Stwierdzenie to nabiera nowego znaczenia podczas przechodzenia od ekstensywnej do intensywnej fazy globalizacji gospodarczej. Faza ekstensywna (trwająca jeszcze obecnie) cechuje się między innymi prostą migracją niektórych miejsc produkcji w tańsze rejony świata. Jednak można przypuszczać, że w dłuższej perspektywie większą konkurencyjność zyskują te przedsiębiorstwa, które ponadto potrafią implementować innowacyjne techniki wytwarzania lokalnie, co m. in. pozwala im wykorzystać istniejącą infrastrukturę i tradycyjne rozbudowane rynki. Takie podejście stanowi cechę intensywnej globalizacji, która w przyszłości zdominuje obecną, w miarę wyczerpania się ekstensywnych możliwości wzrostowych istniejących aktualnie w Azji (Chiny, Indie). Gwałtowny proces nasycania się rynków w nowych krajach członkowskich Unii Europejskiej spowoduje przechodzenie do tej fazy już w ciągu najbliższej dekady. Ta sytuacja narzuca zatem nowe wymagania formom elastycznych systemów produkcji (ESP), które są jednym ze środków zwiększających konkurencyjność przedsiębiorstwa. Koresponduje to również ze strategią lizbońską będącą kierunkiem rozwoju dla państw UE do 2020 r.

Podjęmowane są zatem próby tworzenia nowych form organizacji produkcji zgodnie z ewolucyjnym postępowaniem w zakresie zautomatyzowanych systemów wytwarzania – aż do SAGW (samoregulujące się automatyczne gniazda wytwórcze) i SASW (samoprzekształcające się systemy wytwórcze), co przedstawiono w pracach [2: 14, 45].

Z uwagi na dynamicznie rosnącą złożoność systemów produkcyjnych już klasyczne formy ESP nie mogą sprostać wymogom współczesnej cywilizacji. Prowadzi to do malejącej kontroli człowieka nad tworzonymi systemami, co w przedmiotowym obszarze objawia się niską tolerancją ESP na zakłócenia; stanowi to ich największą wadę. Jej podniesienie, bez konieczności angażowania się w każdym przypadku człowieka, a także wzrost kontroli

złożoności systemu, bez straty jego funkcjonalności, prowadzi do fenomenu inteligentnych systemów produkcyjnych IPS (ang. *Intelligent Production System*)¹⁾. Obiecującą drogą jest przy tym korzystanie z naturalnego (występującego w przyrodzie) paradoksu: konstruowania systemów niezawodnych z elementów zawodnych²⁾.

W obszarze IPS można wyróżnić trzy główne grupy rozwiązań:

- holonowe systemy produkcyjne,
- HMS (ang. *Holonic Manufacturing System*),
- Fraktalne Systemy Produkcyjne FF (ang. *Fractal Factory*),
- Bioniczne Systemy Produkcyjne BMS (ang. *Bionic Manufacturing System*).

Przedstawiony powyżej modelowy podział nie umniejsza znaczenia rozwiązań cząstkowych, o charakterze uniwersalnym, np. z uwagi na możliwość stosowania użytych w nim narzędzi programowych w różnych obszarach. Takim przykładem może być symulacja wytwarzania rozproszonego DMS (ang. *Distributed Manufacturing System*), opartego na standardach CORBA czy MSM Q dla aplikacji middlewarowych, mogących komunikować się w sieciach heterogenicznych również z terminalami offline³⁾.

Niniejsza monografia składa się z czterech rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono główne zagadnienia metodologiczne występujące w projektowaniu i sterowaniu ESP, uwzględniając aspekty techniczne, ekonomiczne i organizacyjne. Zaprezentowano także cechy ESP oraz czynniki ich elastyczności, opisano również koncepcję modelową elastycznego systemu sterowania przepływem produkcji wyrobu złożonego. W rozdziale tym pokazano także miejsce ESP w komputerowo zintegrowanych systemach wytwórczych KZSW oraz omówiono metody i zasady ich projektowania.

W rozdziale drugim zawarto w syntetycznym ujęciu podstawą problematykę ESP, związaną z ich projektowaniem, funkcjonowaniem oraz klasyfikacją w badaniach operacyjnych. Rozdział ten obejmuje również przegląd wybranych metod rozwiązywania problemów szeregowania zadań o wysokim stopniu złożoności wraz z ich implementacją oraz analizą porównawczą.

W rozdziale trzecim przedstawiono współczesne technologie informatyczne stosowane w ESP i ISP. Zawarto w nim podstawowe założenia i wymogi. Opisano techniczne, ekonomiczne i organizacyjne aspekty ich projektowania.

Rozdział czwarty poświęcony jest organizacji i koncepcji rozwoju inteligentnych systemów produkcyjnych (IPS).

Opisano w nim podstawowe pojęcia, strukturę oraz scharakteryzowano proces poszukiwania rozwiązań technicznych.

W powołaniach bibliograficznych każdego rozdziału podaje się tylko numer pozycji wykazu. W powołaniach bibliografii z innych rozdziałów podaje się na początku liczbę z dwukropkiem, wskazującą numer rozdziału, w którym zamieszczona jest dana pozycja lub pozycje bibliograficzne.

¹⁾ Committee on Visionary Manufacturing Challenges. Visionary Manufacturing Challenges for 2020. Washington DC, USA: National Academy Press 1998, s. 21–32.

²⁾ Badurek J.: Świadomość algorytmu – naturalizm i antropocentryzm. Warszawa: IDG Poland „Computerworld”, nr 24/346, 12.06.2000, s. 62–66.

³⁾ Chic S.: Simulation of distributed manufacturing enterprises: a new approach. Sheffield, UK: School of Engineering Sheffield Hallam University, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference 2003, s. 1167–1173.

Wybrane zagadnienia projektowania elastycznych systemów produkcyjnych

W niniejszym rozdziale przedstawiono główne zagadnienia metodologiczne występujące w projektowaniu ESP, z uwzględnieniem ich aspektów techniczno-organizacyjnych, ekonomicznych i społecznych. W rozdziale tym pokazano również miejsce ESP w komputerowo zintegrowanych systemach wytwórczych KZSW (ang. CIM – *Computer Integrated Manufacturing*) oraz omówiono metody i zasady ich projektowania. Szczególne miejsce w prezentowanym rozdziale zajmuje opis metodologii projektowania elastycznych systemów sterowania przepływem produkcji ESS-PP.

W wyniku ewolucji systemów przemysłowych powstały **elastyczne systemy produkcyjne ESP** (ang. *Flexible Manufacturing Systems – FMS*) – rozumiane jako jednostki wytwórcze charakteryzujące się wysokim stopniem integracji procesów technologicznych i pomocniczych oraz procesów informacyjno-decyzyjnych, przy czym stosowanie w takich systemach komputerowego sterowania przebiegiem produkcji oraz odpowiednich środków tzw. miękkiej automatyzacji (software'owych, tj. sterowanych programowo) umożliwia wytwarzanie szerokiego asortymentu wyrobów (o określonych granicach charakterystyk) w partiach o małej liczebności i w dowolnej kolejności.

Sterowanie elastycznymi systemami produkcyjnymi znajduje się na poziomie decyzji dotyczących planowania produkcji na najniższym szczeblu, gdzie występuje odpowiedzialność dyspozytora systemu za terminową realizację zamówień produkcyjnych. Trafność decyzji dotyczących sterowania jest zależna nadal od kompetencji czynnika ludzkiego rozwiązującego dany problem. Poprzez zastosowanie ESP możliwości rozwiązań występujących problemów w porównaniu z konwencjonalną produkcją warsztatową zwielokrotniły się. Niemniej jednak nie są one dostatecznie przejrzyste. Konieczne zatem staje się opracowanie nowych koncepcji modelowych dających do dyspozycji narzędzia do wytwarzania, oceny i analizy strategii produkcyjnych pozwalających na kompleksową integrację procesów zachodzących w systemie produkcyjnym.

1.1. Przesłanki rozwoju ESP

Elastyczne systemy produkcyjne jako nowa forma organizacji wytwarzania pojawiły się i upowszechniły w pierwszej kolejności w wysoko uprzemysłowionych krajach Europy Zachodniej, USA oraz Japonii. Pierwszy egzemplarz ESP został zainstalowany w 1965 r. w USA przez firmę White-Sundstrand. Z początkiem lat siedemdziesiątych powstają dalsze ESP w RFN, Anglii, Japonii, USA i ZSRR. Charakteryzuje je jednak zróżnicowany poziom techniczny przyjętych rozwiązań. Wynika to bezpośrednio z dostępnej dla projektantów i wykonawców bazy elementów i podzespołów do budowy ESP.

Od 1974 roku następuje dynamiczny rozwój ESP związany z wdrażaniem maszyn ze sterowaniem NC i dotyczy to głównie Japonii. W Europie Zachodniej rozwój ten następuje w latach 80.

Do roku 1979 znanych było około 80 koncepcji ESP, które zostały zbudowane i w różnym stopniu rozwinięte w Japonii, USA, Wielkiej Brytanii, w byłej RFN i NRD oraz byłym ZSRR, a także i w Polsce. Przykłady funkcjonujących elastycznych systemów produkcyjnych są szeroko opisane w literaturze. Można je znaleźć m. in. w pracach [7, 27, 29, 33, 44, 49, 59, 60].

Od tego okresu nastąpiło wiele zmian zachodzących w organizacji systemów produkcyjnych, które implikują zupełnie nowe spojrzenie i rozumienie nowoczesnego systemu produkcyjnego. Nowocześnie zorganizowany proces produkcyjny powinien spełnić wymóg elastyczności wytwarzania po to, aby mógł reagować na:

- zmienność żądań rynkowych (krótkie serie i krótkie terminy),
- wdrażanie nowych uruchomień (innowacje produktowe, procesowe),
- zmienności wewnętrzne (stopień wykorzystania stanowisk roboczych i efektywność pracy).

Odpowiedzią na takie wyzwania jest powstanie i rozwój ESP, które jak na razie nawet w wysoko rozwiniętych krajach nie są jeszcze powszechnie wprowadzone. Jeszcze przez wiele najbliższych lat utrzymywać się będzie duża różnica w poziomie nowoczesności przedsiębiorstw w różnych krajach, ale międzynarodowa konkurencja i podział pracy doprowadzą do coraz szerszego stosowania ESP również w naszych przedsiębiorstwach przemysłowych. Warunki panujące aktualnie w przemyśle polskim są porównywalne pod wieloma względami do tych, które kilkanaście lat temu zmusiły gospodarki krajów zachodnich do wprowadzenia pierwszych ESP. Są to więc warunki wystarczająco sprzyjające upowszechnianiu tej nowoczesnej formy organizacji systemów produkcyjnych [7].

Obecnie w Polsce wydaje się konieczne tworzenie systemów produkcyjnych opartych na rozwiązaniach technicznych i organizacyjnych, zapewniających wysoką efektywność funkcjonowania przedsiębiorstwa przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów związanych z oczekiwaniami rynku. ESP mogłyby wnieść istotny postęp w umocnieniu i rozwinięciu strategicznej pozycji przedsiębiorstwa na rynku. Produkcja przedsiębiorstw powinna cechować się:

- elastycznością rozumianą jako cecha systemów przemysłowych, polegająca na ich zdolności adaptacyjnej do zmieniających się wymogów funkcjonowania i warunków otoczenia [2: 55], [3: 26],
- wysokim poziomem technicznym oraz odpowiednim poziomem wyposażenia w nowoczesne urządzenia i technologie, gwarantującym wytwarzanie wyrobów o wysokiej jakości, niezawodności i trwałości,
- ekonomicznością zapewniającą przy akceptowanej przez rynek cenie wyrobów osiągnięcie minimalnych nakładów na produkcję, oszczędne gospodarowanie wszelkiego rodzaju zasobami i możliwie jak najpełniejsze wykorzystanie dotychczasowych osiągnięć.

W zakresie elastyczności systemów produkcji można wyróżnić dwa obszary badań:

- 1) elastyczność jako cecha systemu wytwórczego i związane z nim środki produkcji (wytwarzania), tj. obrabiarki NC i centra obróbkowe, roboty przemysłowe i manipulatory, automatyczne urządzenia transportowe, zautomatyzowane magazyny materiałów, narzędzi i wyrobów, sterowniki mikroprocesowe itp.;
- 2) elastyczność jako cecha całego systemu produkcyjnego wraz z jego podsystemami, w tym wytwórczym, przy czym centralne znaczenie przypisuje się przetwarzaniu in-

formacji w systemie, a więc środkiem informatyki (sprzęt i oprogramowanie) oraz metodom zarządzania z nim skojarzonym.

W pierwszym przypadku zakłada się, że w elastycznym systemie produkcyjnym można wyróżnić dwa podstawowe komponenty:

- 1) **elastyczny system wytwarzania** (ESW), przetwarzający zasoby typowo materialne oraz skojarzony z nim
- 2) **elastyczny system zarządzania** (ESZ), przetwarzający zasoby informacyjne.

ESW zbudowany jest z komputerowo sterowanych obrabiarek, środków transportu i magazynowania oraz środków manipulacyjnych. ESZ zawiera kompleks metod oraz pakietów komputerowych służących do realizacji zadań planowania, harmonogramowania i sterowania produkcją [58, 59].

W takim ujęciu elastyczność uzyskuje się głównie za pomocą automatyzacji procesów produkcyjnych w połączeniu z komputeryzacją planowania i sterowania produkcją (wytwarzaniem), co prowadzi do rozwoju zintegrowanych systemów wytwarzania. Poziom elastyczności systemu określa zakres zadań przezeń realizowanych.

Wdrażanie elastycznych systemów produkcji jest zadaniem interdyscyplinarnym, wymagającym współpracy specjalistów z wielu różnych dziedzin (inżynierów, ekonomistów, informatyków, matematyków itp.). Stwierdzenie to koresponduje z drugim z wymienionych obszarów badawczych, z uwagi na kluczową rolę technologii informacyjnej we współczesnych systemach produkcyjnych. Ów drugi nurt ma charakter integracyjny i wykorzystuje także pojęcie elastyczności definiowane na gruncie czysto informatycznym [26] oraz w sferze organizacji i zarządzania [31].

Uogólniając aktualny poziom wiedzy w tym zakresie, elastyczność produkcji będziemy traktować wielokryterialnie. Spośród wielu rodzaju elastyczności, główny nacisk zostanie położony na elastyczność systemu informacyjnego produkcji oraz wynikające stąd konsekwencje dla stosowanej technologii informatycznej (stanowiącej przedmiot rozważań rozdziału 3). Są one bezpośrednio związane z samą istotą ESP jako systemu produkcji mającego zdolność łatwej adaptacji do dynamicznych wymagań rynku poprzez możliwość ekonomicznego wytwarzania zmiennego asortymentu wyrobów, również w małych seriach.

Wymagania te spełnia elastyczna produkcja, której stosowanie stwarza szansę na funkcjonowanie i utrzymanie się na rynku polskich przedsiębiorstw. Wdrażanie ESP może być realizowane w trojaki sposób [49]:

- drogą ciągłej modernizacji istniejącego systemu produkcyjnego,
- przez stopniowe budowanie systemu produkcyjnego zgodnie z opracowanym planem,
- przez budowę od podstaw nowego systemu produkcyjnego jako jednorazowego przedsięwzięcia inwestycyjnego.

Wybór strategii może być uwarunkowany sytuacją przedsiębiorstwa i cechami nowej technologii. Dzięki możliwościom zmian asortymentowych, wzrostowi wydajności pracy, zmniejszeniu kosztów jednostkowych oraz bardziej atrakcyjnym cechom użytkowym wyrobów elastyczna produkcja może spowodować, że przedsiębiorstwo stanie się konkurencyjne i rentowne. Potwierdzają to elastyczne systemy produkcyjne funkcjonujące w innych krajach.

Podstawowe przesłanki wprowadzenia ESP mają charakter ekonomiczny, organizacyjny i psychologiczno-społeczny.

Przesłanki ekonomiczne wynikają ze zmian sytuacji rynkowej. Utrzymanie się na rynku powoduje konieczność szybkiego reagowania na potrzeby odbiorców. Zmienne wymagania rynkowe zmuszają producentów do produkowania szerokiego asortymentu wyso-

kojakościowych wyrobów w partiach o małej liczebności sztuk, przy minimalnych środkach obrotowych, bez magazynowania. Zadania produkcyjne nie mogą być realizowane wcześniej niż przewiduje plan, lecz muszą być realizowane zgodnie z terminem zamówienia. Automatyzacja produkcji zmierza ponadto do podniesienia poziomu eksploatacji urządzeń, a tym samym wydłużenia czasu ich użytkowania. Wysoki stopień wykorzystania obrabiarek idzie w parze ze zmniejszeniem ich liczby przy wykonywaniu zadań tej samej wielkości. Daje to niższe koszty wyposażenia. Zastosowanie ESP powoduje zmniejszenie materiałochłonności i energochłonności produkcji i procesów oraz powoduje zmniejszenie względnych nakładów na półfabrykaty, zespoły i części na jednostkę produkcji.

Przesłanki organizacyjne wynikają z:

- a) możliwości wykorzystania rezerw tkwiących w organizacji pomocniczych procesów produkcyjnych (np. transport, magazynowanie, czynności manipulacyjne), zmniejszenia zapasów robót w toku oraz cykli produkcyjnych,
- b) poprawy struktury wykorzystania funduszu czasu pracy i urządzeń dzięki usprawnieniom organizacyjnym, uzyskanym na drodze postępu technicznego, jak:
 - automatyzacja prac inżynierskich – prowadząca do obniżenia pracochłonności sterowania cykli projektowania wyrobów i procesów produkcyjnych, a także skrócenia realizacji zadań;
 - zmiany w konstrukcji obrabiarek powodujące wzrost możliwości technologicznych przez poszerzenie zakresu funkcji;
 - opracowanie narzędzi do sztucznej inteligencji, głównie systemów eksperckich;
 - zwiększenie wydajności pracy i produktywności wytwarzania.

Przesłanki psychologiczno-społeczne wynikają z:

- zmniejszenia zainteresowania pracami manualnymi oraz uciążliwymi i szkodliwymi dla zdrowia,
- wzrostu zainteresowania pracami koncepcyjnymi,
- orientacji na formy organizacji pracy sprzyjające zaangażowaniu pracowników, zrozumieniu i docenianiu przez nich znaczenia i istoty wykonywanych prac,
- humanizacji pracy przez większą wygodę stanowisk pracy, wykorzystanie wiedzy i doświadczeń pracujących, ich stałe doskonalenie, wzbogacanie treści pracy, włączając bardziej złożone zadania,
- intensyfikacji pracy oraz wzbogacenia jej treści, zwiększających samodzielność pracownika i jego udział w podejmowaniu decyzji i zarządzaniu produkcją. Czynniki wpływające na wprowadzenie i rozwój ESP omówiono m. in. w pracach [26, 27, 33, 82].

1.2. Podstawowe cechy ESP

Elastyczność systemów produkcyjnych jest cechą umożliwiającą ich łatwe dostosowywanie się do zmieniających się warunków otoczenia, zmian parametrów wyrobów produkowanych w krótkich lub średnich seriach, zmian cech materiałów produkcyjnych itp. Można więc zmieniać asortyment i wielkość serii produkowanych wyrobów z dnia na dzień bez przebrojenia maszyn stosownie do zmieniających się potrzeb.

Elastyczność uzyskuje się dzięki daleko posuniętej nie tylko automatyzacji procesów produkcyjnych połączonej z komputeryzacją planowania i sterowania produkcją, ale przede wszystkim przez automatyzację systemów przeobrażania.

Poziom elastyczności systemu produkcyjnego wyznacza zakres zadań przezeń realizowanych. Rozpatrywana problematyka jest szczególnie ważna w warunkach gospodarki urynkowanej, wymuszającej na producentach zdolność do szybkiego reagowania na potrzeby odbiorców.

Elastyczny system sterowania produkcją winien zapewnić uzyskanie następujących efektów:

- urozmaicenie asortymentu produkowanych wyrobów,
- skrócenie czasów przebrojeń i czasu uruchomienia nowych wyrobów,
- skrócenia cyklu produkcyjnego i zmniejszenie zapasów produkcji w toku,
- możliwość lepszego przystosowywania się do wymogów odbiorców (np. krótsze terminy dostaw, krótsze serie, częstsze zmiany asortymentów).

Uzyskanie powyższych efektów jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej metodologii projektowania, zapewniającej wysoki poziom technologiczny i organizacyjny.

ESP jest złożonym projektem inwestycyjnym. Praca na każdym etapie jego projektowania rozpoczyna się od badania rynku, a więc zapotrzebowania i możliwych do uzyskania cen produktu. Po uzyskaniu tych informacji rozpoczyna się właściwy proces projektowania. Wiodącym kryterium na każdym etapie projektowania jest opłacalność przyjmowanych rozwiązań. Prace projektowe w aktualnym modelu gospodarczym prowadzi się na trzech etapach:

- 1) koncepcji projektu,
- 2) studium inwestycyjnego,
- 3) założeń techniczno-ekonomicznych.

Elastyczne systemy produkcyjne służą do pełnej automatyzacji produkcji mała i średnioseryjnej w zakresie przedmiotów technologicznie podobnych. Elastyczność wynika z luźnego powiązania obrabiarek, czasy przebrożenia ograniczone są do minimum, a praca odbywa się według dziennych programów produkcyjnych.

Podstawowymi walorami technicznymi ESP oraz źródłem efektów przy ich stosowaniu są:

- kompleksowa automatyzacja obróbki części technologicznie podobnych wytwarzanych w niewielkich seriach,
- duża elastyczność w asortymencie obrabianych przedmiotów i w liczbie operacji technologicznych,
- skrócenie cyklu produkcyjnego,
- skrócenie czasu wykonania nowo uruchomionych wyrobów mieszczących się w asortymencie przedmiotów przewidzianych do obróbki w danym systemie,
- zmniejszenie zapasów surowców, robót w toku i wyrobów gotowych oraz kosztów ich magazynowania,
- podwyższenie stopnia wykorzystania obrabiarek, narzędzi i powierzchni produkcyjnej,
- zmniejszenie liczby braków,
- uporządkowanie dróg transportu międzyoperacyjnego oraz wyeliminowanie ciężkiej pracy fizycznej związanej z przemieszczeniem obrabianych przedmiotów,
- łatwa kontrola przebiegu produkcji,
- podniesienie kultury technicznej zakładu oraz dalsza humanizacja pracy.

ESP zapewniają bardziej efektywne wytwarzanie wyrobów w warunkach produkcji małoseryjnej, co ma istotne znaczenie przy silnej konkurencji i rosnących wymaganiach rynkowych, wymuszających szybkie wdrażanie nowych wyrobów w licznych wariantach i odmianach, przy zachowaniu wysokiego poziomu jakości i niskiego kosztu wytwarzania.

Wdrażanie ESP wymaga stosowania nowoczesnych urządzeń produkcyjnych, takich jak: centra obróbkowe, roboty manipulacyjne, technologiczne i montażowe, zautomatyzowane wózki transportowe, modularne systemy narzędzi, uchwytów, chwytaków, palet itp. Ponadto muszą być stosowane odpowiednie systemy informatyczne nadzorujące prace urządzeń, zapewniające szybki i niezawodny przepływ informacji oraz rozdział operacji produkcyjnych gwarantujący możliwie wysokie wykorzystanie zdolności produkcyjnych. Tym samym dużej wagi nabiera zagadnienie prawidłowego zaprojektowania systemu produkcyjnego tak, aby zadania produkcyjne były realizowane prawidłowo i w sposób możliwie efektywny.

Budowa ESP o wyższym stopniu automatyzacji nie jest możliwa bez stosowania nowoczesnych metod modelowania i komputerowego wspomaganie prac projektowych. Metody te są m.in. przedmiotem rozważań niniejszej książki.

Dla celów projektowania ESP, a w szczególności w zagadnieniach planowania, harmonogramowania i sterowania procesami dyskretnymi, sięga się do metod stosowanych w modelowaniu systemów operacyjnych komputerów i do modeli badań operacyjnych.

Większość znanych w świecie ESP pracuje w przemyśle maszynowym. Literatura specjalistyczna i raporty badawcze wskazują na występowanie dwu klas problemów teoretyczno-metodycznych związanych z wykorzystaniem tych systemów. Są to problemy rozwiązań strukturalnych i funkcjonalnych ESW.

W elastycznych systemach produkcyjnych celowy jest wybór modeli, które uwzględniają postulat szybkiego czasu reakcji. Prostota, jasność i efektywność algorytmów projektowania, elastyczność planowania, szybkość i trafność decyzji, alternatywność rozwiązań winny decydować o wyborze metody budowy systemu. Z uwagi na dużą dynamikę nieprzewidzianych zmian i zakłóceń w procesie produkcyjnym sterowanie przebiegiem produkcji winno odbywać się przy zastosowaniu metod algorytmicznych prostych i przybliżonych typu heurystycznego.

Duża ilość przetwarzanej informacji i postulat elastyczności wymagają zastosowania systemu informatycznego o konfiguracji zapewniającej szybką, ciągłą i dwustronną komunikację między stanowiskiem pracy a komputerem. Potrzebna konfiguracja musi zawierać zatem terminale zainstalowane w pobliżu stanowisk pracy, umożliwiające bezpośrednie przesyłanie do komputera informacji o zmianach stanu zasobów produkcyjnych i o stanie realizacji zadań oraz otrzymanie z komputera informacji sterujących. Najbardziej efektywne rozwiązanie można uzyskać przy zastosowaniu komputerowych układów automatyki (KUA) oraz lokalnych sieci komputerowych (LSK) opisanych w pracy [82].

Prace związane ze zdefiniowaniem podstawowych pojęć ESP podjęto na forum międzynarodowym w Zrzeszeniu Europejskich Producentów Obrabiarek CECIMO [65, 79] i w RWPG. Opracowano również projekt Polskiej Normy [44], dotyczącej problematyki zautomatyzowanych elastycznych obrabiarek i ESW.

Ważniejsze nazwy i określenia zawierają prace [27, 39, 41, 46, 76, 77].

1.3. Czynniki elastyczności systemów produkcyjnych

Środkiem służącym do tworzenia elastycznych systemów produkcyjnych jest wprowadzenie do produkcji nowych rodzin obrabiarek sterowanych numerycznie (w tym również centrów obróbkowych), aż do powstania zautomatyzowanych obiektów produkcyjnych takich, jak centra i systemy produkcyjne sterowane komputerem.

Należy zauważyć, że stosowanie obrabiarek sterowanych komputerem (CNC) jest bardziej elastyczne od konwencjonalnych ONC. Istnieje możliwość zmiany na stanowisku operatorskim całych cykli obróbkowych, czego nie można dokonać w konwencjonalnych obrabiarkach sterowanych numerycznie.

Zastosowanie centrów produkcyjnych w procesach wytwarzania prowadzi do wyraźnej poprawy stopnia wykorzystania nominalnego czasu pracy. W centrach tych proces produkcyjny został w pełni zautomatyzowany i obejmuje zarówno obróbkę, transport i magazynowanie części, jak i sterowanie oraz kontrolę całego procesu, łącznie z automatycznym opracowaniem danych przez komputer [39].

Stosowanie obrabiarek wyposażonych w automatyczny układ: magazyn-podajnik narzędzi, który wybiera i zmienia narzędzia we wrzecionie (zawierającym 15 do 20 narzędzi) zgodnie z programem danego zabiegu obróbkowego – w zależności od potrzeb technologicznych – jak również automatyczna wymiana całych wrzecienników, wpływa znacznie na uelastycznienie produkcji.

Następnym środkiem uelastycznienia produkcji jest usprawnienie sposobów mocowania przedmiotów obrabianych. Stosuje się tu różnego rodzaju chwytaki. Bardziej elastycznym sposobem jest stosowanie tzw. paletyzacji. Palety służą do mocowania przedmiotów obrabianych na stanowiskach załadowczo-rozładowczych i są zaliczane do urządzeń przenoszących oraz podających.

Podawanie przedmiotów obrabianych na obrabiarkę może odbywać się za pomocą:

- stołów podziałowych, wahadłowych lub obrotowych,
- pojazdów transportujących – wózków,
- manipulatorów i robotów przemysłowych,
- linii transportowych.

Sposób podawania przedmiotów obrabianych i odprowadzania ze strefy obróbki jest uzależniony od stopnia zautomatyzowania systemu. Również istotny wpływ na uelastycznienie produkcji ma sposób magazynowania palet z przedmiotami już obrobionymi. ESP mają centralne magazyny palet, skąd za pomocą manipulatorów lub linii transportowych są one dostarczane i odprowadzane do i ze strefy obróbki i ponownie magazynowane.

Palety z przedmiotami przeznaczonymi do obróbki są zakodowane, podajnik wybiera z magazynu paletę o określonym kodzie i dostarcza na obrabiarkę. Palety z przedmiotami obrobionymi dostarczone są z magazynu na stanowisko załadowczo-rozładowcze, gdzie następuje odmocowanie przedmiotów i wysyłanie na zewnątrz.

Na podobnej zasadzie jak magazynowanie palet zorganizowany jest centralny magazyn narzędziowy, gdzie przechowuje się i skąd dostarcza się na obrabiarkę kompletne zestawy narzędziowe lub całe wrzecienniki. W ESP przewidziano również automatyczne odprowadzenie wiórów ze strefy obróbki oraz centralne odprowadzanie i doprowadzanie chłodziwa.

Podsumowując rozważania na temat środków elastyczności produkcji, można stwierdzić, że stosowanie odpowiednich obrabiarek NC z automatyczną wymianą narzędzi, mocowania i manipulacji przedmiotów obrabianych, transportu, magazynowania przedmiotów i narzędzi, odprowadzanie wiórów itp., są głównymi czynnikami uelastycznienia produkcji.

Ewolucja własności i nowych cech systemów produkcyjnych doprowadzała w kolejnych latach do kształtowania się następujących form organizacji produkcji:

- elastycznego modułu produkcyjnego,
- elastycznego gniazda produkcyjnego,

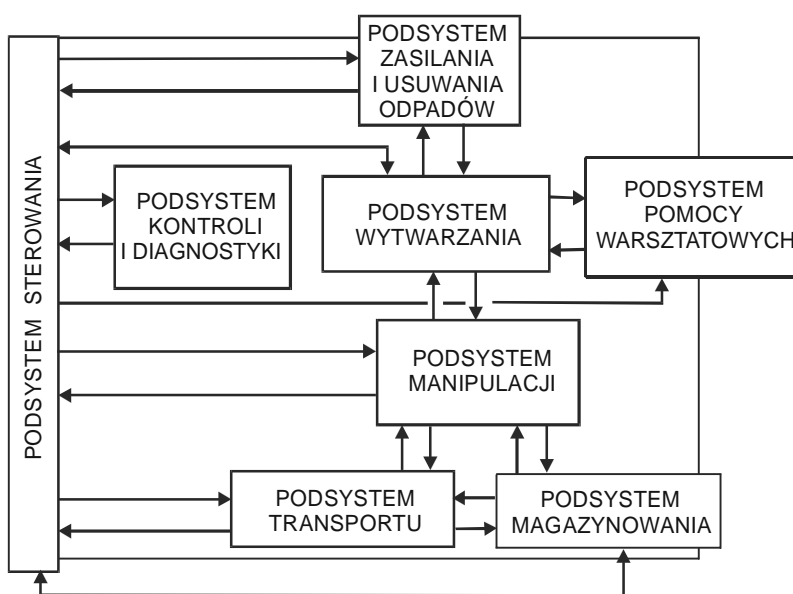
- elastycznej linii produkcyjnej,
- elastycznej sieci produkcyjnej (nazywanej także wydziałem produkcyjnym).

Szczegółowy opis tych pojęć znajdujemy w pracach: [7, 27, 50].

1.4. Struktura funkcjonalna ESP

Jednym z najważniejszych zadań przy projektowaniu ESP jest wybór komponentów systemu oraz ich odpowiednia konfiguracja funkcjonalna. Nadrzędną rolę odgrywa komputerowy system sterowania i nadzoru. Na podstawie podobieństwa realizowanych funkcji można wyróżnić następujące podsystemy ESP (rys. 1.1):

- wytwarzania,
- transportu,
- magazynowania,
- manipulacji,
- pomocy warsztatowych,
- zasilania i usuwania odpadów,
- sterowania,
- kontroli i diagnostyki.



Rys. 1.1. Podsystemy funkcjonalne ESP [27]

Powiązania między elementami systemu produkcyjnego związane są z przepływem określonych rodzajów strumieni (zasilen). Ze względu na rodzaj tych zasilen można wyróżnić następujące podsystemy przepływu strumieni:

- **materiałowych:** przedmiotów pracy, pomocy warsztatowych, materiałów pomocniczych, odpadów itp.;

- **energetycznych:** energii elektrycznej, sprężonego powietrza, oleju hydraulicznego itp.;
- **informacyjnych:** podsystem sterowania, podsystem kontroli i diagnostyki.

Podsystem wytwarzania jest głównym podsystemem funkcjonalnym ESP. Realizuje on bowiem podstawowe zadania systemu, decydując o wydajności, jakości produkcji, elastyczności, stopniu automatyzacji, nakładach inwestycyjnych itp. Podsystem wytwarzania stanowią urządzenia technologiczne, maszyny, obrabiarki i stanowiska robocze realizujące określone metody wytwarzania: kształtowania, obróbki, łączenia, powlekania itp., a także funkcje pomocnicze: usuwanie wiórów, mycie, zmiana zamocowania przedmiotów, itp. Umożliwia on wytwarzanie przedmiotów o wspólnych cechach technologicznych i zróżnicowanych konstrukcjach. Jest ukształtowany w taki sposób, że wszystkie informacje sterujące potrzebne do obróbki albo pozostają do dyspozycji pamięci układów CNC obrabiarek, albo są doprowadzane do tych obrabiarek z pamięci centralnej. Wszystkie narzędzia do obróbki muszą być dostarczane do obrabiarki w sposób automatyczny. W wielu przypadkach istnieje też konieczność wbudowania w obrabiarki czujników wykorzystywanych do celów diagnostycznych. Elementy podsystemu wytwarzania stanowią główne miejsce nadania i odbioru wszystkich strumieni zasileń.

Podsystem pomocy warsztatowych stanowią narzędzia skrawające, pomiarowe i kontrolne, palety i uchwyty.

Podsystem przepływu strumieni materiałów przetwarzanych, energetycznych i innych stanowią urządzenia i środki techniczne zapewniające przepływ materiałów i energii w ESP. Podsystem ten musi realizować funkcje transportu, magazynowania i manipulacji w odniesieniu do przedmiotów obrabianych, narzędzi oraz uchwytów lub ich części oraz strumieni energetycznych. Wywiera on najistotniejszy wpływ na konfigurację ESP.

Poszczególne podsystemy składowe omawianego podsystemu przepływu strumieni materiałowo-energetycznych spełniają następujące funkcje:

- podsystem transportu – przemieszczenie przedmiotów pracy, palet, narzędzi,
- podsystem magazynowania – przechowywanie materiałów, półfabrykatów, zapasów produkcji w toku, wyrobów gotowych, palet, narzędzi itp.,
- podsystem manipulacji – m.in. przekazywanie przedmiotów pracy, palet i narzędzi, składanie i zdejmowanie przedmiotów z obrabiarki, zmiana narzędzi na obrabiarence.

Podsystem przepływu strumieni informacyjnych obejmuje urządzenia techniczne wraz z oprogramowaniem realizujące funkcje sterowania, diagnostyki i kontroli. Zawiera on następujące podsystemy:

- podsystem sterowania obejmujący urządzenia i oprogramowanie zapewniające sprawne sterowanie procesem wytwórczym;
- podsystem kontroli i diagnostyki produkowanych wyrobów, narzędzi, obrabiarek, parametrów procesu. Jest on źródłem danych o przebiegu procesu dla podsystemu sterowania ESP.

Podsystem sterowania procesem wytwórczym koordynuje i nadzoruje działanie wszystkich podsystemów funkcjonalnych i urządzeń w ESP. Istotą podsystemu sterowania jest oddziaływanie na proces produkcyjny w celu realizacji zadań produkcyjnych ujętych w formie planu produkcji na określony czas. System sterowania w podstawowym procesie produkcyjnym realizuje następujące funkcje:

- planowanie i sterowanie przepływem produkcji, np. terminowość zleceń, obciążenie zasobów,

— sterowanie urządzeniami produkcyjnymi, np. informacje sterujące do urządzeń technologicznych czy pomiarowych.

W procesie produkcyjnym pomocniczym można wyróżnić następujące funkcje systemu sterowania:

- zapewnienie odpowiedniej jakości produkowanych wyrobów, np. sterowanie urządzeniami kontroli, reagowanie na powstałe odchylenie jakości,
- sterowanie procesami transportu, np. inicjacja i realizacja operacji transportowych,
- sterowanie procesami magazynowania, np. sterowanie wewnętrznymi magazynami, poziomem zapasów,
- sterowanie procesami gospodarki narzędziowej, np. sterowanie magazynowaniem, dostawą i wymianą uchwytów, narzędzi, kontrola i diagnostyka narzędzi,
- sterowanie procesami utrzymania ruchu maszyn i urządzeń, np. rejestracja czasu pracy, raportowanie stanu dostępności zasobów.

Elastyczność systemu sterowania procesem wytwórczym polega na zdolności dostosowywania się jego elementów do zmieniających się zadań produkcyjnych (funkcji). W tej klasie systemów mówi się w szczególności o **elastyczności zadaniowej** systemu sterowania, tj. łatwości reagowania na zmiany ilościowo-asortymentowe i zakłócenia w operatywnym sterowaniu produkcją oraz o **elastyczności adaptacyjnej**, tj. podatności na zmiany zakresu funkcji systemu sterowania zasobów procesu produkcyjnego (stanowisk, urządzeń, magazynów i środków transportowych) lub innej konfiguracji, treści, zakresu, struktur i formatu przetwarzanych danych, procedur i metod podejmowania decyzji. Szczegółowy opis podsystemów funkcjonalnych ESP zawarty jest m.in. w pracach [27, 31, 33, 49, 54].

Propozycja elastycznego systemu sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego wyrobów złożonych została przedstawiona w pkt 1.7 niniejszej pracy. Niektóre jego elementy z przykładami aplikacji zawierają inne publikacje autorki [82–84].

1.5. Model komputerowo zintegrowanego systemu wytwórczego – KZSW

Koncepcja komputerowo zintegrowanego systemu wytwórczego KZSW (ang. *Computer Integrated Manufacturing – CIM*) powstała w 1973 r. Jest to system, w którym wszystkie funkcje i elementy uczestniczące w realizacji procesu produkcyjnego są zintegrowane przez jednolity system informacyjno-decyzyjny i sterowany przez komputery. Powstał on w wyniku połączenia przetwarzania informacji technicznej i ekonomicznej przy wykorzystaniu wysoko zaawansowanych technologii informatycznych. KZSW stanowi integrację modułów bazowych KWK z KWP i KWPP, KWA, KWJK, PPS, KWW. Ma on strukturę hierarchiczną, pracuje na wspólnej bazie danych i wiedzy dla całego systemu produkcyjnego. Koncepcję zintegrowanego systemu wytwarzania ilustruje rys. 1.2, gdzie:

KZW – komputerowo zintegrowane wytwarzanie (ang. CIM – *Computer Integrated Manufacturing*),

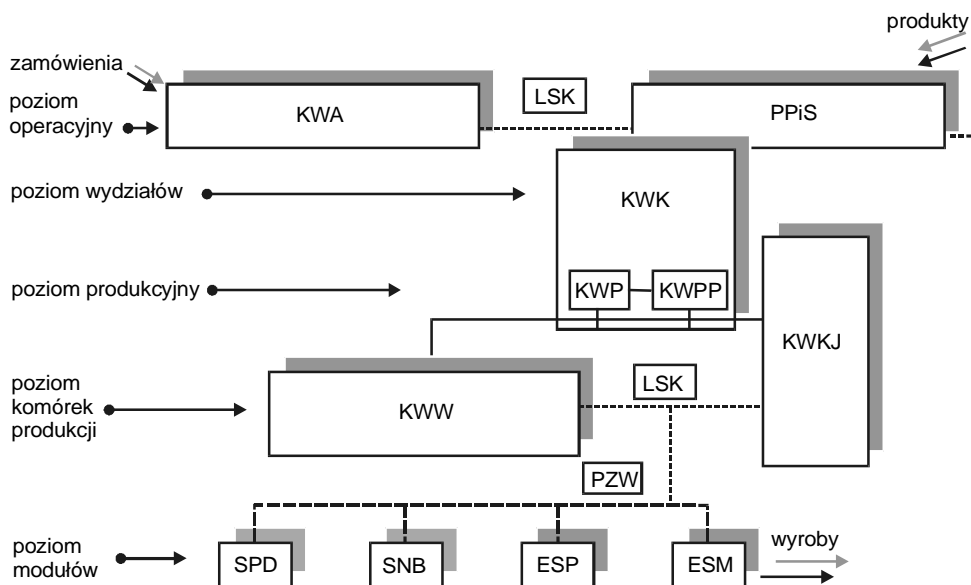
KWA – komputerowo wspomagana administracja (ang. CAA – *Computer Aided Administration*),

PPS – planowanie produkcji i sterowanie (ang. PPS – *Production Planing System*),

KWK – komputerowo wspomagane konstruowanie (ang. CAE – *Computer Aided Engineering*),

KWP – komputerowo wspomagane projektowanie (ang. CAD – *Computer Aided Design*),

- KWPP** – komputerowo wspomagane planowanie produkcji (ang. CAP – *Computer Aided Planning*),
- KWKJ** – komputerowo wspomagana kontrola jakości (ang. CAQA – *Computer Aided Quality Assurance*),
- KWW** – komputerowo wspomagane wytwarzanie (ang. CAM – *Computer Aided Manufacturing*),
- SPD** – system pobierania danych (ang. DAS – *Data Acquisition System*),
- KSC** – komputerowe sterowanie cyfrowe (ang. CNC – *Computer Numerical Control*),
- SNB** – sterowanie numerycznie bezpośrednie (ang. DNC – *Direct Numerical Control*),
- ESM** – elastyczny system montażowy (ang. FAS – *Flexible Assembly System*),
- ESP** – elastyczny system produkcyjny (ang. FMS – *Flexible Manufacturing System*),
- PT** – protokół techniczny (ang. TOP – *Technical Office Protocol*),
- PZW** – protokół zautomatyzowanego wytwarzania (ang. MAP – *Manufacturing Automation Protocol*),
- LSK** – lokalna sieć komputerowa (ang. LAN – *Local Area Network*).



Rys. 1.2. Schemat strukturalny komputerowego zintegrowanego systemu wytwarzania (KZSW)

Inne opisy tego systemu zawarte są w licznych pracach [12, 27, 31, 41].

Wejściem dla tego systemu jest materiał, narzędzia, urządzenia oraz energia, natomiast wyjściem stanowią wyprodukowane wyroby oraz ich dokumentacja. Pomiędzy poszczególnymi poziomami systemu występują sprzężenia, które powodują wymianę informacji, nieodzowną podczas prac produkcyjnych oraz korekcyjnych.

System składa się z zamkniętych podsystemów występujących na różnych płaszczyznach wytwarzania, wspólnie powiązanych systemem komputerowym (informatycznym) i lokalną siecią (LSK). Cechą charakterystyczną komputerowo zintegrowanych systemów produkcyjnych jest wysoki poziom ich integracji i automatyzacji. Oznacza to powszechne stosowanie w systemach KZW sieci komputerowych, rozproszonego przetwarzania

danych, a także wykorzystania metod sztucznej inteligencji i systemów zarządzania rozproszonymi bazami danych. Większość praktycznych problemów i trudności związanych z zapewnieniem pełnej integracji i automatyzacji wszystkich podstawowych funkcji, wynika ze złożoności procesów komunikacyjnych. Te problemy i trudności, łączenie różnego rodzaju sprzętu komputerowego i oprogramowania, wskazują na podstawowe znaczenie, jakie dla rozwoju systemów typu KZW mają zagadnienia komunikacji oraz interfejsów umożliwiających integrację elementów składowych.

Komputerowo zintegrowany system wytwórczy, oprócz komputerowo wspomaganego wytwarzania KWW, obejmuje komputerowe wspomaganie prac inżynierskich KWK z konstrukcyjnym i technologicznym przygotowaniem produkcji oraz komputerowo wspomagane sterowanie jakością produkcji KWKJ. W skład KWK wchodzi komputerowo wspomagane projektowanie wyrobów i metod wytwarzania KWP oraz komputerowo wspomagane projektowanie procesów produkcyjnych KWPP. W KWP komputer wykorzystywany jest do konstrukcji wyrobu i technologii jego produkcji. Za jego pomocą tworzone są rysunki, schematy, wykazy części, a rezultaty procesów projektowania wykorzystywane są w innych obszarach systemu wytwórczego, np. programy dla obrabiarek CNC wykorzystywane są w KWW. W obszarze KWPP występuje planowanie pracy, od wytwarzania części przez montaż, po pakowanie i wysyłkę wyrobów. Z wykorzystaniem komputera planowany jest asortyment produkcji, program produkcji oraz zasoby materiałowe. W KWKJ komputer stosowany jest do testowania CAT (ang. *Computer Aided Testing*), w celu zapewnienia jakości produkcji oraz statystycznej analizy SPC (ang. *Statistical Process Control*). KWW obejmuje system pobierania danych produkcyjnych i eksploatacyjnych SPD oraz system SNB, w którym zmagazynowane są programy sterujące obrabiarkami i innymi urządzeniami produkcyjnymi. W systemach ESP oraz ESM komputer steruje rzeczywistym wytwarzaniem i montażem poprzez dostarczanie we właściwym czasie odpowiednich materiałów, programów, narzędzi i części do urządzeń produkcyjnych oraz montażowych.

System PPIs (PPS – ang. *Production Planning System*) obejmuje komputerowo wspomagane planowanie produkcji i sterowania w różnych horyzontach czasowych, które mogą być rozważane z punktu widzenia wielopoziomowej struktury sterowania i zarządzania produkcją i odnosić się do poziomów planowania strategicznego, taktycznego i operatywnego. Główne problemy planowania produkcji w ESP¹⁾ dotyczą:

- **planowania asortymentu produkcji,**
- **grupowania stanowisk,**
- **przydziału zasobów pomocniczych,**
- **przydziału operacji,**
- **harmonogramowania operacji.**

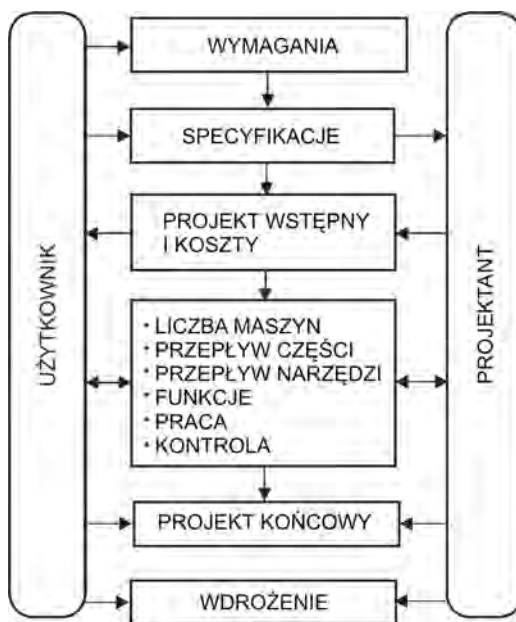
System KWA obejmuje komputerowe wspomaganie administracji (księgowość, rachunkowość, planowanie przedsięwzięć). Wszystkie sprzężone ze sobą elementy KZW wykorzystują te same, ciągle aktualizowane informacje i tę samą centralną bazę danych, w której zapamiętywane są wszystkie dane dotyczące produkcji i realizowanych zamówień. Poszczególne elementy KZW komunikują się ze sobą i z bazą wiedzy za pomocą dokładnie zdefiniowanych kanałów informacyjnych, takich jak LSK, PT i PZW.

W procesie projektowania zintegrowanych systemów produkcyjnych, projektant dokonuje wyboru szeregu procedur realizacyjnych i projektowych prowadzących do uzyska-

¹⁾ Beynon P., Davies: Inżynieria systemów informacyjnych. Warszawa: WNT 1999.

nia projektu na podstawie parametrów techniczno-ekonomicznych oraz kryteriów. Kryteria mogą mieć charakter wymierny i niewymierny. Do podstawowych **kryteriów wymiernych** służących ocenie kompleksowo zaprojektowanego systemu możemy zaliczyć [11]:

- czas i formę przepływu materiału przez proces produkcyjny,
- stopień elastyczności przyjętego rozwiązania wyrażony liczbą przedmiotów (wyrobów) możliwych do obróbki i montażu bez zmiany oprzyrządowania,
- stopień niezawodności wyrażony czasem bezawaryjnej pracy oraz wymaganym czasem i częstotliwością obsługi i napraw okresowych,
- poziom jakości produkowanych wyrobów,
- wydajność systemu,
- produktywność,
- efektywność ekonomiczną eksploatacji systemu wyrażoną poziomem kosztów własnych i zysku w określonych przedziałach czasu kalendarzowego,
- efektywność inwestycyjną projektowanego systemu wyrażoną okresem zwrotu kapitału, wewnętrzną stopą procentową porównywaną ze stopą bankową.



Rys. 1.3. Współpraca użytkownik-projektant w procesie projektowania ESP, wg [12]

Można wymienić następujące **niewymierne kryteria** optymalizacji systemu produkcyjnego [11]:

- spełnienie wymogów ergonomicznych i ochrony pracy,
- zadowolenie z pracy,
- podatność na sterowanie wspomagane komputerowo,
- integrację z systemem przygotowania produkcji i możliwości korzystania ze wspólnego banku danych,

— możliwość realizacji systemu pod względem technicznym i możliwość uzyskania wykwalifikowanych kadr do obsługi systemu.

Uwzględnienie wyżej sformułowanych kryteriów projektowych powinno zapewnić uzyskanie efektów techniczno-ekonomicznych przedstawionych w pkt 1.2 niniejszej pracy.

Projekt systemu produkcyjnego, lub jego elementów, powstaje na drodze dialogu między użytkownikiem a projektantem systemu. Współpracę tę zilustrowano na rys. 1.3.

Tabela 1.1

Lista głównych czynności projektowych i decyzyjnych w procesie projektowania systemów CIM [12]

Sekwencja działań	Główne czynności w procesie projektowania		Zakres podejmowania decyzji realizacyjnych
1	2		3
Decyzja początkowa	I	Decyzja o przystąpieniu do opracowania ZTE	Wyniki i ocena badań wstępnych i możliwości finansowych
Analiza	II	Analiza celu i zadania projektowego <ul style="list-style-type: none"> – określenie konstrukcyjno-technologicznych i organizacyjnych cech wyrobów – analiza marketingowa przyjętego planu produkcji – badanie zależności pomiędzy wielkościami planistycznymi i organizacyjno-technicznymi – klasyfikacja i grupowanie części, zespołów i wyrobów gotowych – określenie przebiegu procesu produkcyjnego 	<ul style="list-style-type: none"> – rodzaj wyrobu – grupy wyrobów – czas wytworzenia (pracochłonność technologiczna) – kolejność operacji technologicznych – optymalna wielkość partii i czasokres zmiany – postulowany poziom: elastyczności, niezawodności, jakości, produktywności i kosztów własnych
Synteza	III	Ukształtowanie określonych elementów systemu produkcyjnego i rozmieszczenie <ul style="list-style-type: none"> – ustalenie wymiennych i niewymiennych kryteriów wyboru elementów systemu produkcyjnego – obliczenie (zwymiarowanie) elementów systemu dla przyjętego programu produkcyjnego – ustalenie ograniczeń użytkowych i warunków brzegowych modelowanego systemu – wybór form komputerowego sterowania systemu i jego elementów – symulacja komputerowa systemu w celu ciągłego doskonalenia rozwiązań strukturalnych i rozmieszczenia elementów systemu 	<ul style="list-style-type: none"> – rodzaj i liczba urządzeń produkcyjnych i środków transportu – pojemność i rodzaj magazynów: głównego, międzyoperacyjnego i narzędziowego – rodzaj i liczba robotów przemysłowych oraz manipulatorów – rodzaj i liczba komputerów wraz z urządzeniami peryferyjnymi – czas i forma przepływu materiałów przez proces produkcyjny – osiągnięty poziom rozwiązywania projektowego w zakresie: elastyczności, niezawodności i jakości
Synteza	IV	Kompozycja systemu produkcyjnego <ul style="list-style-type: none"> – modelowanie zasadniczego rozwiązania systemu produkcji i symulacja komputerowa zintegrowanego systemu produkcji CIM 	<ul style="list-style-type: none"> – stopień standaryzacji technologii – stopień automatyzacji produkcji – stopień komputeryzacji systemu – stopień realizacji podstawowych

cd. tab. 1.1

1	2		3
		– określenie parametrów techniczno-ekonomicznych i społecznych (wymiernych i niewymiernych) dla każdego wariantu	funkcji systemu
Ocena	V	Ocena techniczno-ekonomiczna i wybór wariantów na podstawie wartościowania i porównań	produktywność ogólna, produktywność częściowa zaprojektowanego systemu (produktywność kapitału, pracy, maszyn, urządzeń)
Decyzja końcowa	VI	Decyzja o przejęciu rozwiązania do realizacji lub przekazanie do powtórzonego projektowania	stopień spełnienia kompleksu kryteriów wymiernych i niewymiernych

Pierwszym etapem w procesie tworzenia projektu systemu jest zdefiniowanie przez użytkownika wymagań produkcyjnych zapewniających zaspokojenie obecnych i przyszłych potrzeb.

Wymagania produkcyjne i technologiczne stanowią główny element specyfikacji użytkownika. We współpracy użytkownik-projektant można wyróżnić cztery podstawowe obszary: podaną przez użytkownika definicję wymagań produkcyjnych i specyfikację, ocenę projektu wstępnego, współpracę między użytkownikiem i projektantem w celu określenia projektu końcowego oraz instalację i zastosowanie systemu.

W procesie projektowania, projektant wykonuje szereg czynności projektowych i podejmuje decyzje na podstawie oceny parametrów techniczno-ekonomicznych i wyżej wymienionych kryteriów wymiernych i niewymiernych. Zasadnicze znaczenie dla znalezienia optymalnego rozwiązania ma określenie istotnych czynników wywierających wpływ zarówno na wytwarzane wyroby, jak i na zastosowane wyposażenie. Główne czynności projektowe i decyzyjne w procesie projektowania komputerowo zintegrowanych systemów produkcyjnych zawarte są w tabeli 1.1 [12].

Projektant, w celu uzyskania ostatecznego wariantu rozwiązania, już we wstępnej fazie projektowania korzysta z porad ekspertów przy wyborze typowych rozwiązań systemowych dla zintegrowanych systemów produkcji. Warianty rozwiązań kompleksowych systemu produkcyjnego uzyskuje się na podstawie opracowanych elementarnych struktur. W zależności od typu produkcji wariantami mogą być elastyczne moduły produkcyjne, elastyczne gniazda i linie produkcyjne, niekiedy elastyczne oddziały i zakłady, a znacznie rzadziej komputerowo zintegrowane systemy produkcyjne.

Elastyczne systemy produkcyjne stanowią integralną część zintegrowanego komputerowo systemu produkcyjnego i ich zakres sterowania jest przedmiotem rozważań autorki.

1.6. Metodologia projektowania elastycznych systemów sterowania przepływem produkcji (ESS-PP)

Metodologia projektowania była i jest obecnie przedmiotem zainteresowania wielu badaczy. Pierwsze publikacje z tego zakresu powstały w 1963 r. W tym też czasie sformułowano treści i cele metodologii jako nauki. Były to prace G. Nadlera [35] i M. Asimowa [2] oraz E. W. Kricka [20]. W Polsce problematyką projektowania zajmowała się liczna grupa autorów i zespołów badawczych. Z ciekawszych prac zawierających ogólne sformu-

łowania metodologiczne można zwłaszcza wymienić [14, 42]. Metodologią projektowania systemów informatycznych zajmowali się między innymi: Z. Gackowski [13], W. Gasparski z zespołem [42], J. L. Kulikowski [23, 24, 25], H. Zygiel [90], E. Yourdon [81], M. Bazewicz [6], E. Niedzielska [36, 37]. Metodologią programowania zajmuje się W.M. Turcki [66, 67]. Metodologią projektowania banków danych technologicznych zajmowali się m. in. T. Gontarczyk [16, 17], T. Sawik [50], J. Martin [32], J. D. Ullman [68]. Interesujące podejście do omawianej problematyki znajdujemy również w pracach [13, 38, 39], P. Beynona [2: 1], G. Conlouvisa, J. Dollimore, T. Kindberga,¹⁾ J. Górskiego (red.) [40].

Metodologia projektowania ESP znajduje się w stadium tworzenia, istnieją tylko nieliczne opracowania na ten temat [7, 27, 83]. Interesujące wprowadzenie do tematu stanowi praca H. Kowalowskiego²⁾. Znajdujemy w niej pewne zasady metodologiczne w projektowaniu zautomatyzowanych systemów sterowania z zastosowaniem robotów. Autor tej pracy m. in. określa zakres podstawowych czynności, które należy uwzględnić w poszczególnych etapach projektowych. Wprowadzenie do problematyki komputerowego wspomaganie projektowania i eksploatacji elastycznie zautomatyzowanych systemów produkcji dyskretnej z przykładami zastosowań w praktyce przemysłowej podają Z. Banaszek i W. Muszyński w pracy [8]. Zagadnienie metodologiczne z przykładami aplikacji przemysłowych znajdujemy również we wcześniejszych pracach autorki [82–89].

1.6.1. Podstawowe etapy projektowania w komputerowo wspomaganym systemach produkcyjnych

Celem metodologii projektowania jest określenie podstawowych metod i zasad projektotwórczych na poszczególnych etapach projektowania, które zostały poniżej wymienione:

- 1) ogólne sformułowanie problemu technicznego,
- 2) formalizacja pojęć, budowa modelu matematycznego,
- 3) wybór algorytmów rozwiązań,
- 4) sprecyzowanie kryteriów optymalizacyjnych,
- 5) opracowanie schematów algorytmów,
- 6) opracowanie bazy danych,
- 7) analiza i synteza rozwiązań,
- 8) opracowanie i testowanie programów,
- 9) opracowanie dokumentacji programowej i eksploatacyjnej,
- 10) wdrożenie.

Przy założeniu, że znany jest matematyczny aparat pojęciowy oraz sformułowane zostały ww. podstawowe etapy projektowania opisane w pracy [82] s. 98–106, można sprecyzować zasady metodologiczne odnoszące się do tych etapów. Każdy z wymienionych powyżej etapów zawiera cały szereg procedur projektowych. Przykładowo przedstawiono podstawowe czynności projektowe odnoszące się do wybranych modułów (2, 4, 5) pierwszego etapu projektowania ESP:

- 1) zebranie i analiza wejściowych danych techniczno-ekonomicznych (dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej, pracochłonności, wyposażenie narzędzi, transportu, organizacji produkcji, kosztów itd.),

¹⁾ Conlouis G., Dollimore J., Kindberg T.: Systemy rozproszone, podstawy i projektowanie. Warszawa: WNT 1998.

²⁾ Kowalowski H.: Automatyzaacja dyskretnych procesów przemysłowych. Warszawa: WNT 1998.

- 2) analiza asortymentu detali, grupowanie według kryteriów konstrukcyjnych technologicznych, określenie typu każdej grupy,
- 3) wybór marszrut technologicznych dla poszczególnych typów na dane obrabiarki,
- 4) określenie technologii obróbki zgrubnej i jej parametrów czasowych,
- 5) określenie czasu obróbki pozostałych detali poprzez porównanie ich z detalami typowymi,
- 6) określenie dokładnej technologii obróbki dla poszczególnych grup detali,
- 7) określenie liczby obrabiarek sterowanych numerycznie zastosowanych w ESP,
- 8) określenie rodzajów, ilości narzędzi oraz potrzebnego wyposażenia technicznego,
- 9) określenie rodzajów kontroli oraz środków technicznych niezbędnych do kontroli,
- 10) określenie struktury i pojemności magazynów oraz transportu międzyoperacyjnego,
- 11) określenie stopnia automatyzacji oraz koniecznych zewnętrznych i wewnętrznych połączeń,
- 12) zabezpieczenie programowe i aparaturowe,
- 13) określenie wymagań dotyczących systemu energetycznego i architektury sieci,
- 14) opracowanie wariantów systemu oraz ich analiza i ocena,
- 15) wybór określonego wariantu do konkretnego etapu prac projektowych.

Szczegółowe czynności projektowe odnoszące się do sformułowania problemu technicznego zawarte są w pracy [82]. Punktem wyjścia jest sformułowanie podstawowych problemów metodologicznych (pkt 1.6.2) oraz sprecyzowanie kryteriów (technicznych, organizacyjnych, ekonomicznych i psychologiczno-społecznych) służących do rozwiązania tych problemów we wszystkich fazach projektowania (schemat projektowania ESS-PP przedstawiono na rys. 1.4).

1.6.2. Podstawowe zadania metodologiczne oraz kryteria projektowania ESS-PP

Najważniejsze zadania metodologiczne mające podstawowe znaczenie w projektowaniu ESS-PP są następujące:

- 1) określenie zbioru funkcji związanych z realizacją procesów pomocniczych i podstawowych,
- 2) określenie integracji,
- 3) określenie elastyczności,
- 4) konstrukcja Banku Danych Technologicznych (BDT) i Systemu Zarządzania Bankiem Danych Technologicznych (SZBDT),
- 5) wybór i konstrukcja algorytmów,
- 6) wybór i konfiguracja sprzętu oraz architektura sieci,
- 7) ocena ekonomicznej efektywności,
- 8) ocena niezawodności.

Dalej zostaną scharakteryzowane wcześniej wymienione problemy oraz zostanie przedstawiony schemat projektowania ESS-PP (rys. 1.4).

Podstawowym zadaniem jest określenie zbioru funkcji związanych z realizacją procesów pomocniczych i podstawowych, przy uwzględnieniu takich czynników, jak:

- struktura procesu,
- typ budowy procesu,
- sposób powiązań.

System sterowania współpracuje ze wszystkimi podsystemami funkcjonalnymi ESP oraz z otoczeniem (rys. 1.4). Za pomocą podejmowanych decyzji i przesyłanych danych i informacji realizuje on określone funkcje w procesach produkcyjnych podstawowych i pomocniczych, takie jak: planowanie i sterowanie przepływem produkcji, sterowanie urządzeniami produkcyjnymi, sterowanie procesami transportu, magazynowania i gospodarki narzędziowej, zapewnienie jakości produkcji i utrzymanie ruchu maszyn. Na zakres funkcji związanych z realizacją procesów pomocniczych i podstawowych mają wpływ m. in. struktura procesu i sposoby powiązań elementów. Można wyróżnić następujące struktury procesu: **punktową, liniową, ukierunkowaną i zwartą (gniazdową)**.

Ze względu na sposób realizacji powiązań elementów systemu produkcyjnego można wyróżnić:

- systemy produkcyjne, w których brak jest powiązań stanowisk,
- systemy produkcyjne o bezpośrednich powiązaniach stanowisk,
- systemy produkcyjne o pośrednich powiązaniach stanowisk.

Typ budowy procesu wynika z liczby elementów realizujących powiązania (tzw. elementy strukturotwórcze) włączonych do podsystemu przepływu strumieni. Zbiory elementów realizujących powiązania ze względu na podobieństwo ich funkcji tworzą następujące podsystemy:

- manipulacji (PM),
- przemieszczeń (PP),
- dystrybucji (PD).

Uwzględniając wyżej wymienione grupy czynników, można w ogólnym przypadku określić strukturę procesów w systemie oraz liczbę realizujących je elementów. To z kolei jest podstawą dla ustalenia **integracji i elastyczności**. Pojęcia te stanowią główne aspekty, które należy uwzględnić w projektowaniu ESP.

Integracja najogólniej oznacza scalanie względnie niezależnych od siebie, lecz współdziałających elementów w jedną całość. Elementami podlegającymi integracji w systemie mogą być zarówno elementy jego organizacji statycznej (stanowisko pracy), jak i organizacji dynamicznej (operacje i procesy).

Integracja systemu produkcyjnego rozumiana jest w dwu aspektach: jako integracja funkcjonalna i techniczna [8, 49, 83].

Integracja funkcjonalna ESP polega na włączeniu do projektowanego systemu, podsystemu lub elementu, niezbędnych procesów i związanych z nimi funkcji.

Integracja funkcjonalna oznacza włączenie do systemu:

- procesów przygotowania produkcji,
- procesów planowania i sterowania,
- procesów kontroli jakości, projektowania i inne.

Oczywiście wzrost integracji funkcjonalnej powoduje wzrost złożoności systemu oraz jego kompleksowości, co w rezultacie powoduje zwiększenie jego autonomii.

Stopień integracji funkcjonalnej jest przy tym równy:

$$IF = \frac{i_{FS}}{i_F}, \quad (1.1)$$

gdzie: i_{FS} – liczba procesów lub funkcji włączonych do systemu,

i_F – liczba wszystkich procesów (lub funkcji) niezbędnych dla realizacji określonych zadań systemu, podsystemu lub elementu.

Wielkość $K = i_F - i_{FS}$ wyraża zakres powiązań kooperacyjnych systemu, podsystemu lub elementu.

Koncepcję zintegrowanego systemu wytwarzania ilustruje rys. 1.2.

Integracja techniczna oznacza fizyczne zespolenie elementów systemu produkcyjnego. Określa ona poziom koncentracji przestrzennej funkcji realizowanych w systemie. Prowadzi do redukcji liczby elementów systemu bez zmniejszenia liczby funkcji realizowanych w systemie. Zatem towarzyszy temu wzrost wielostronności elementów systemu. Wzrostowi stopnia integracji towarzyszy natomiast wzrost stopnia automatyzacji realizowanych przezeń funkcji [28, 51].

Stopień integracji technicznej wyraża się wzorem:

$$IT = \frac{i_{TS}}{i_{T\max}} = 1 - \frac{n-1}{i_{FS}-1}, \quad (1.2)$$

gdzie: i_{TS} – osiągnięty stopień zespolenia elementów systemu,

$i_{T\max}$ – stopień maksymalnie możliwego zespolenia elementów systemu,

n – liczba rodzajów elementów systemu.

Celem integracji technicznej jest zmniejszenie liczby elementów systemu produkcyjnego w odniesieniu do zasobów systemu: pracowników, przedmiotów pracy i środków pracy; związek między integracją funkcjonalną i techniczną wyraża tzw. **stopień koncentracji funkcji**:

$$f = \frac{i_{FS}}{n}, \quad (1.3)$$

gdzie: f – stopień koncentracji funkcji,

i_{FS} – liczba procesów lub funkcji włączonych do systemu,

n – liczba rodzajów elementów systemu.

Obie integracje, funkcjonalna i techniczna, prowadzą do wzrostu autonomii systemu, tzn. powodują wzrost jego niezależności od otoczenia i obsługi ręcznej.

Reasumując dotychczasowe rozważania nad cechami ESP, możemy stwierdzić, że automatyzacja i integracja działają w jednym kierunku. Wzrost stopnia automatyzacji powoduje wzrost stopnia integracji i odwrotnie. Są to więc cechy w pewnym stopniu synergiczne.

Kolejny element projektowania ESS-PP to elastyczność; jest ona własnością systemu produkcyjnego, polegającą na zdolności dostosowania się jego elementów do zmieniających zadań produkcyjnych.

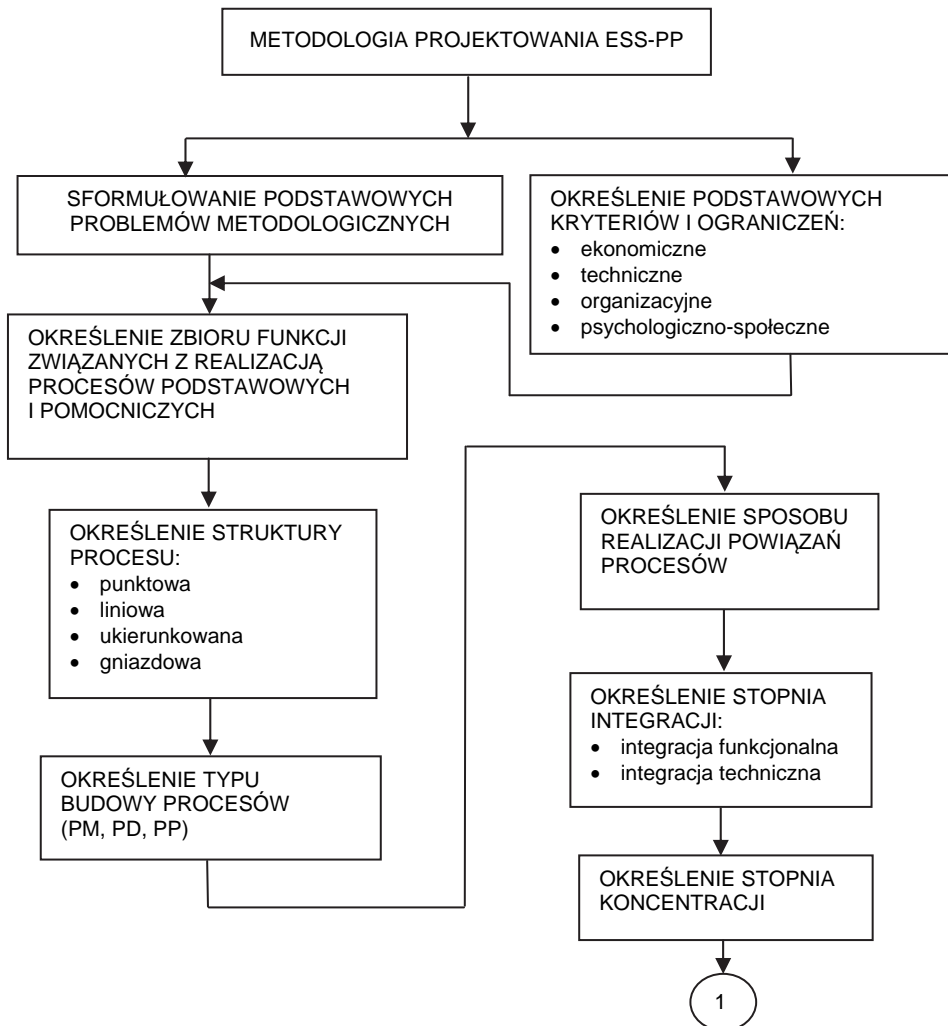
Wyróżnia się między innymi następujące rodzaje elastyczności:

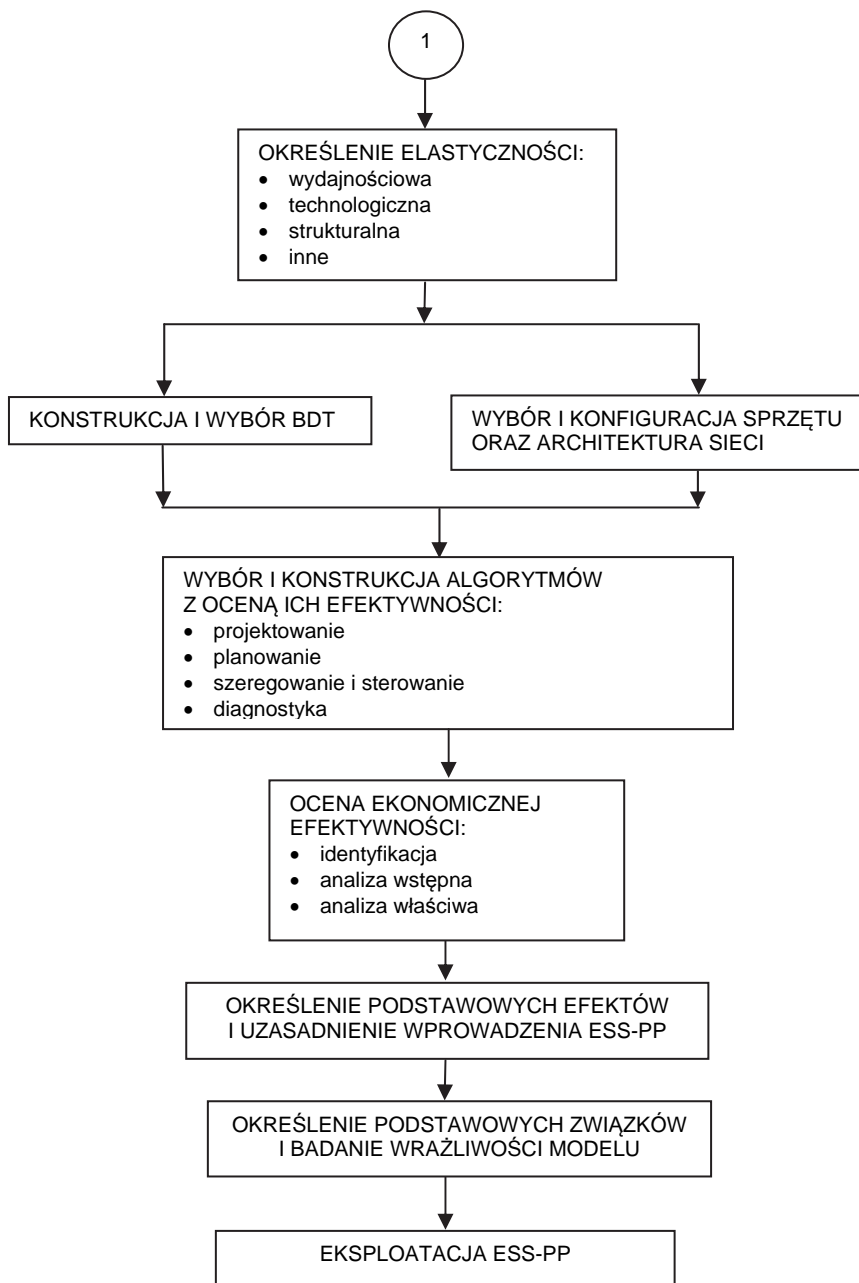
- asortymentową,
- technologiczną,
- wydajnościową,
- strukturalną,
- ekspansyjną i inne.

Elastyczność asortymentowa jest mierzona różnorodnością i licznością typów przedmiotów należących do produkowanej klasy wyrobów. Liczność ta jest określona dla danego ESP i jego wyposażenia (palety, uchwyty, narzędzia, roboty, manipulatory itp.), tzn. bez uwzględnienia możliwości potencjalnej rozbudowy ESP, czy zmiany jego wyposażenia.

Elastyczność technologiczna polega przede wszystkim na zakresie możliwości zmiany narzędzi i przyrządów potrzebnych do wykonania operacji lub zabiegów obróbkowych. Związana jest ona z możliwością realizacji zadań produkcyjnych o różnych parametrach konstrukcyjno-technologicznych. Znaczenie elastyczności technologicznej wzrasta z częstotliwością zmian oraz ze wzrostem asortymentów produkcyjnych.

Elastyczność marszrutowa – jest to zdolność systemu do zmiany marszrutu technologicznej produkowanych przedmiotów. Zdolność ta wynika ze stosowania w ESP alternatywnych (zamiennych wzajemnie) maszyn, w ten sposób, że funkcje jednej maszyny obróbczej może przejąć inna. Alternatywność może dotyczyć również innych urządzeń pomocniczych lub transportowych. Elastyczność marszrutowa zapewnia możliwość szybkiego reagowania na wszelkie zakłócenia (np. rolę maszyny ulegającej awarii może przejąć inna maszyna równoważna jej funkcjonalnie, choć niekoniecznie identyczna), sprzyja również zwiększeniu stopnia wykorzystania maszyn [2: 8].





Rys. 1.4. Schemat projektowania ESS-PP

Elastyczność ilościowa (wydajnościowa) oznacza zdolność przystosowania się systemu do zmiennego asortymentu i długości serii poszczególnych wyrobów. Innymi słowy,

jest to zdolność do efektywnego ekonomicznie działania systemu w warunkach zmiennych ilościowo zadań produkcyjnych.

Elastyczność ekspansyjna jest miernikiem możliwości rozbudowy systemu. Jest ona charakterystyczna oraz większa dla modułowych ESP.

Elastyczność strukturalna dzieli się na elastyczność struktury systemu produkcyjnego i struktury procesu.

Elastyczność systemu produkcyjnego jest zdeterminowana dwoma czynnikami: **elastycznością elementów systemu produkcyjnego**, tj. zdolnością realizowania przez nie różnych zadań produkcyjnych, oraz **elastycznością struktury systemu**, polegającą na możliwości realizacji powiązań różnych elementów systemu związanych z wykonywaniem przez nie zmiennych zadań w czasie i przestrzeni.

Rozpatrując pojęcie elastyczności w systemie sterowania przebiegiem produkcji, mówi się w szczególności o **elastyczności zadaniowej i elastyczności adaptacyjnej**.

Elastyczność zadaniowa polega na łatwości reagowania na zmiany ilościowo-asortymentowe i zakłócenia w operatywnym sterowaniu produkcją.

Elastyczność adaptacyjna polega na zdolności systemu produkcyjnego do samodzielnego przygotowywania się do produkcji nowych wyrobów w zmiennej kolejności ich zleceń.

Elastyczność energetyczna jest to zdolność systemu do przystosowania się do zmiennego zapotrzebowania energetycznego.

Elastyczność eksploatacyjna urządzeń i całego systemu polega na możliwości natychmiastowego usunięcia awarii i wszelkich odchyień w jak najkrótszym czasie.

Wszystkie wymienione elastyczności są ze sobą wzajemnie sprzężone i łącznie decydują o wyższej produktywności, wydajności i efektywności ekonomicznej.

W elastycznych systemach produkcyjnych elastyczność i integracja osiągnane są dzięki automatyzacji, która z kolei jest realizowana środkami techniki komputerowej.

1.6.3. Ilościowe wskaźniki elastyczności

Pojęcia elastyczności systemów umożliwiają dokonywanie ilościowych porównań różnych wariantów ESP. Poniżej zostanie przedstawiona przykładowa ilościowa metoda określająca stopień elastyczności systemów. Według pracy [2: 8] **globalny wskaźnik elastyczności** systemu produkcyjnego możemy określić za pomocą współczynnika K_o z następującej zależności:

$$K_o = \sqrt[n]{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n}, \quad (1.4)$$

gdzie: K_1, K_2, \dots, K_n – współczynniki elastyczności n elementów ESP.

Określenie współczynników elastyczności K_i zależy od wyboru elementów składowych. Rozważmy przykładowo K_o wyznaczony dla dwu podsystemów ESP, którymi są odpowiednio: podsystem centrów obróbkowych i gniazd obróbczych oraz podsystem zautomatyzowanego transportu międzystanowiskowego. Pierwszy z podsystemów będzie określany wskaźnikiem elastyczności K_1 , drugi – K_2 .

Dla podsystemu składającego się z centrów obróbkowych i gniazd, współczynnik elastyczności określa się jako:

$$K_1 = \sqrt{K_{1,v} \cdot K_{1,f}}, \quad (1.5)$$

$$K_{1,v} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m \cdot v_{\max}} \quad (1.6)$$

gdzie: $K_{1,v}$ – współczynnik elastyczności charakteryzującej liczbę detali, których obróbka jest możliwa w każdej z m podstawowych komórek technologicznych ESP,
 v_i – liczba detali obrabianych w i -tej komórce technologicznej,
 m – liczba wyróżnionych komórek technologicznych (np. liczba elastycznych modułów produkcyjnych danego ESP),
 $v_{\max} = \max\{v_i \mid i \in \overline{1, m}\}$ – maksymalna liczba elementów obrabianych w jednej komórce technologicznej,
 $K_{1,f}$ – współczynnik elastyczności strukturalnej.

Ponieważ

$$\sum_{i=1}^m v_i \leq m \cdot m \cdot v_{\max}, \quad (1.7)$$

więc maksymalną wartością współczynnika $K_{1,v}$ jest 1. Współczynnik $K_{1,v}$ jest tym większy, im mniejsza jest nadmiarowość dopuszczalnej liczby przygotówek względem faktycznej ich liczby. Przykładowo, jeśli wyróżnimy 3 komórki technologiczne (np. 3 elastyczne gniazda produkcyjne) i w każdej komórce można obrabiać każdy z 10 detali, to $K_{1,v} = (10 + 10 + 10) / (3 \cdot 10) = 1$. W drugim przypadku, gdy w poszczególnych komórkach można wytwarzać przykładowo 5, 10, 10 detali, otrzymujemy współczynnik: $K_{1,v} = (5 + 10 + 10) / (3 \cdot 10) = 25/30$.

Współczynnik elastyczności strukturalnej $K_{1,f}$ określa się z podziału elementów ESP na tzw. grupy złożoności. Dla każdej z grup określa się współczynnik α_i charakteryzujący operacje kształtowania detali pod kątem możliwości wykonania zabiegów i kontroli detali. Przykładowo współczynniki α_i mogą być funkcją liczby stopni swobody poszczególnych urządzeń. W zależności od liczby stopni swobody dla każdej z grup złożoności można wyróżnić wskaźniki $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,2$, $\alpha_3 = 0,3$, $\alpha_4 = 0,4$, $\sum \alpha_i = 1$, gdzie i – liczba stopni swobody danej grupy komponentów ESP. Wówczas współczynnik elastyczności strukturalnej $K_{1,f}$ dla danego ESP określa się jako:

$$K_{1,f} = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^l m_i}, \quad (1.8)$$

gdzie: l – liczba grup złożoności (w przytoczonym przykładzie $l = 4$),
 m_i – liczba elementów i -tej grupy złożoności, charakteryzowanej wartością współczynnika α_i .

Współczynnik elastyczności K_2 , charakteryzujący drugi z wyróżnionych podsystemów, a mianowicie zautomatyzowany podsystem transportu, określamy w sposób następujący. Załóżmy, że transport realizowany jest pomiędzy N punktami. Jeśli zautomatyzowany podsystem transportu realizowałby przejścia pomiędzy wszystkimi N punktami, to maksymalna liczba przejść (w obu kierunkach) wynosi:

$$t_{\max} = 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} t_i, \quad (1.9)$$

gdzie: t_i – liczba przejść z i -tej pozycji do pozostałych punktów.

Niech t_e będzie liczbą realizowanych przez system transportu przejść, wówczas:

$$K_2 = \frac{t_e - N + 1}{t_{\max} - N + 1}. \quad (1.10)$$

Można zauważyć, że $K_2 = 0$ dla sztywno zautomatyzowanej linii produkcyjnej (liczba możliwych przejść t_e wynosi $N - 1$) oraz $K_2 = 1$, gdy mamy do czynienia ze swobodnym ESP.

W analogiczny sposób można określić współczynniki elastyczności dla innych komponentów systemów.

Elastyczność asortymentowa systemu K_A , charakteryzowana przez wskaźnik ilościowy określający procent różnych detali, jakie mogą być produkowane w systemie bez wprowadzenia w nim dodatkowych urządzeń, mocowań, palet itp.), jest określona jako [2: 1]:

$$K_A = \frac{\sum_{d \in D} x_d}{n}, \quad (1.11)$$

gdzie: $K_A = 1$, jeżeli detal d może być wytwarzany w systemie,
 0, jeżeli nie,
 $n = \text{card}(D)$ – liczba detali.

Elastyczność marszrutowa K_M może być obliczona jako średnia arytmetyczna elastyczności marszrutowej poszczególnych detali $d \in D$, wyrażona poniższą zależnością [8]:

$$K_M = \frac{\sum_{d \in D} \frac{y_d}{n_d}}{n}, \quad (1.12)$$

gdzie: y_d – liczba różnych marszrut możliwych do zrealizowania przez dany system transportowy dla danego detalu $d \in D$,
 n_d – liczba możliwych marszrut uwzględniających kolejnościowe ograniczenia operacji.

Jeżeli $K_M = 1$, to mówimy, że elastyczność marszrutowa jest całkowita. Liczne inne przykłady ilościowego określenia stopnia elastyczności zawierają prace [8, 50, 51].

Kolejnym zagadnieniem projektowania ESS-PP jest **oprogramowanie, konstrukcja banku danych technologicznych (BDT) i wybór systemu zarządzania tym bankiem (SZBDT)**. Biorąc pod uwagę rodzaj realizowanych zadań, w omawianej klasie systemów sterowania oprogramowanie można podzielić na [27]:

- zarządzające pracą systemu i poszczególnych modułów,
- transmisji danych między poszczególnymi komputerami i urządzeniami peryferyjnymi oraz między systemem sterowania a innymi systemami zakładowymi,
- zarządzające bazą danych,
- komunikacji z operatorami: ESP i stanowisk,

- realizujące obliczenia, według przyjętych algorytmów, czyli programy wspomaganie lub automatycznego podejmowania decyzji.

Przykłady oprogramowania, konstrukcji bazy danych oraz system zarządzania bazą danych w ESP zawierają prace [72, 73, 85, 86], [3: 1, 4, 5, 55].

W rozważanej klasie systemów bazę danych (BDT) konstruuje się dynamicznie, a więc na bieżąco, stosownie do zmieniających się zadań technologa. Stosuje się tu **rozproszone bazy danych**. Najogólniejszymi problemami rozproszonych baz danych są:

- optymalizacja wielkości przesyłu danych między komputerami,
- sterowanie współbieżnością polegającą na szeregowaniu transakcji (kolejnych zadań),
- integralność danych.

Generatory baz danych zapewniają z kolei dużą adaptacyjność do nowych rodzajów formatów i struktur danych. O wyborze systemu zarządzania bankiem danych technologicznych (SZBDT) decydują:

- własności eksploatacyjne,
- wymagania techniczno-organizacyjne,
- uwarunkowania zewnętrzne.

Elementy strukturalne baz danych ESS-PP są następujące:

- 1) **dane stałe** obejmujące:
 - dane opisujące system lub jego fizyczne elementy,
 - dane wykorzystane w procesie kontroli,
- 2) **dane zmienne** konstruowane dynamicznie i uaktualnione w czasie pracy systemu, które obejmują:
 - dane opisujące zmieniający się stan elementów systemu i dotyczące np. realizowanych zadań produkcyjnych, narzędzi, środków transportu, stanowisk, komunikatów o awariach i innych zakłóceniach,
 - dane organizacyjne związane z planowaniem przebiegu produkcji i dotyczące m. in. dyspozycji stanowisk, narzędzi, palet, otwartych zleceń, produkcji w toku, statystyk opisujących wybrane parametry realizacji procesów.

Przechowywane dane muszą być odpowiednio zdefiniowane. Wiąże się z tym pojęcie modelu danych. Najczęściej spotykanymi modelami danych są: modele relacyjne, sieciowe i hierarchiczne. Od pewnego czasu coraz częściej tworzy się także obiektowe bazy danych.

Obecnie wykorzystuje się profesjonalne systemy zarządzania bazami danych (np. Oracle). Można je adaptować do wymagań danego systemu produkcyjnego lub tworzyć własne, specyficzne systemy zarządzania danymi.

Systemy zarządzania danymi w ESS-PP, oprócz wykonania podstawowego zadania, jakim jest zapewnienie użytkownikowi dostępu do danych, muszą spełniać również inne zadania, m. in.:

- zabezpieczenie danych przed ingerencją ze strony osób nieupoważnionych,
- synchronizowanie operacji wykonywanych przez wielu użytkowników jednocześnie,
- umożliwienie pracy systemu w czasie rzeczywistym – konieczna jest wysoka wydajność systemu,
- zapewnienie integralności danych,
- umożliwienie prezentacji danych w postaci graficznej.

Szczegółowe omówienie problematyki baz danych oraz systemów zarządzania bazami danych w ESP uwzględniając współczesne technologie informatyczne zostanie przedstawione w rozdziale 3 niniejszej pracy.

Bardzo ważne zagadnienie, występujące w modelowaniu ESS-PP, stanowią **wybór i konstrukcja algorytmów** w zakresie:

- diagnostyki,
- projektowania,
- planowania,
- szeregowania,
- sterowania.

Wybór algorytmów w wymienionych obszarach problemowych uwarunkowany jest ich efektywnością, której miarą jest złożoność obliczeniowa. Poza warunkiem logicznej poprawności algorytmów żąda się, aby zapewniały one możliwie najkrótsze czasy obliczeń, które zależne są od ilości zmiennych i jakości komputera. Zasadnicze znaczenie przywiązuje się do czasów obliczeń, które decydują o czasie realizacji systemu. Zagadnienie złożoności obliczeniowej opisane jest w pracach [82, 83], przykłady aplikacji przemysłowych algorytmów wybranych na podstawie złożoności obliczeniowej ESS-PP zawierają prace [29, 88, 89], natomiast klasyfikację algorytmów w wymienionych obszarach problemowych przedstawia rozdział 2 niniejszej pracy.

Kolejne zadanie to wybór i konfiguracja sprzętu oraz architektura sieci komputerowych. Wysoki stopień integracji i automatyzacji w ESP wiąże się ze stosowaniem sieci komputerowych, rozproszonego przetwarzania danych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz systemów zarządzania rozproszonymi bazami danych. Łączenie różnego rodzaju sprzętu oraz oprogramowanie powoduje, że duże znaczenie mają zagadnienia komunikacji oraz interfejsów umożliwiających integrację elementów składowych.

Podstawowymi czynnikami decydującymi o wyborze i konfiguracji sprzętu w elastycznych systemach produkcyjnych są:

- koszt konfiguracji,
- przepustowość i wydajność systemu,
- dostępność (gotowość systemu),
- wymagania niezawodnościowe,
- kompatybilność strukturalna,
- oprogramowanie,
- możliwość realizowania procesów komunikacyjnych w czasie rzeczywistym,
- sprzętowa i programowa zdolność do przetwarzania rozproszonego.

Do sterowania w ESP stosowane są układy wielokomputerowe o odpowiedniej architekturze sieci lokalnych. Pakiety komunikacji w sieciach lokalnych umożliwiają wzajemny bezpośredni dostęp do zasobów (w tym zbiorów danych) pracujących w sieci użytkowników i urządzeń. Stosowanie układów wielokomputerowych o odpowiedniej architekturze sieci lokalnych wynika z wielu przyczyn:

- sterowanie jest bardziej dokładne, dzięki czemu uzyskuje się oszczędności energii, surowców oraz obniżenie kosztów produkcji;
- uzyskuje się bieżącą i wiarygodną informację, co umożliwia personelowi kierowniczemu efektywniej planować harmonogramy produkcji i zabezpieczenie materiałowe;
- ewentualne zmiany w procesie produkcyjnym mogą być dokonywane znacznie szybciej i ze zmniejszonym ryzykiem. Dotyczy to zarówno parametrów, jak i technologii, a na-

wet struktury układu sterującego. Umożliwia on szybką reakcję na potrzeby klientów przy zmianie asortymentów wyboru;

- w celu zwiększenia niezawodności układu;
- redukcji liczby kabli do przesyłania sygnałów o dużym obiekcie.

W ESS-PP można wyróżnić dwa podstawowe typy struktur konfiguracji sprzętu:

- 1) **scentralizowaną**, tj. z wyróżnionym komputerem centralnym wykonującym podstawowe funkcje systemu sterowania (planowanie operatywne produkcji i dyspozycja operacji produkcyjnych) i współpracującym z pozostałymi komputerami systemu oraz z układami sterowania pracą urządzeń ESP,
- 2) **zdecentralizowaną**, w której nie występuje jednostka spełniająca funkcje nadrzędne.

Układy scentralizowane mogą mieć strukturę:

- **jednopoziomową** – komputer centralny wykonuje całość obliczeń i przetwarzania danych. Współpracuje bezpośrednio ze sterownikami i terminalami poszczególnych stanowisk i urządzeń;
- **jednopoziomową z podwójnym komputerem centralnym** – komputery te na ogół realizują odrębny zakres funkcji, natomiast w warunkach awarii jednego z komputerów występuje przejście jego funkcji przez drugi sprawny, co pozwala uniknąć zakłóceń lub zatrzymania pracy ESP;
- **dwupoziomową z komputerem centralnym oraz szeregiem podporządkowanych mu komputerów lokalnych.**

Zdecentralizowany układ sterowania składa się z szeregu komputerów i urządzeń terminalnych, wykonujących równoległe różnorakie przypisane im funkcje.

Układy zdecentralizowane oraz scentralizowane układy dwupoziomowe są przykładem realizacji idei przetwarzania rozproszonego, a w szczególności umożliwiają stosowanie rozproszonych baz danych. Szczegółowy opis dotyczący architektury systemów sterowania produkcją w ESP zawierają prace: [8, 26, 27, 82].

Komunikowanie się poszczególnych elementów ESS-PP jest możliwe dzięki zastosowaniu technologii lokalnych sieci komputerowych LSK. Sieci lokalne mogą być skonfigurowane w jednym z następujących typów [3: 1, 9], [6]:

- gwiazdy,
- pierścienia lub pętli,
- magistrali.

Podstawowymi środkami zapewniającymi elastyczność ESS-PP są:

- nowoczesne obrabiarki,
- centra obróbkowe,
- spaletyzowane centra obróbkowe,
- autonomiczne stacje obróbkowe,
- roboty manipulacyjne i montażowe,
- środki automatyzacji transportu i magazynowania,
- systemy narzędziowe (uchwytów, chwytaków i palet),
- sprzęt komputerowy z oprogramowaniem,
- urządzenia diagnostyki i kontroli jakości.

Wybór wymienionych komponentów jest uwarunkowany kryteriami technicznymi, ekonomicznymi i psychologiczno-społecznymi.

Integralną częścią projektowania ESS-PP jest ocena jego ekonomicznej efektywności. Poniżej zostaną przedstawione z ogólnego punktu widzenia aspekty metodologiczne projektowania omawianej klasy systemów, natomiast szczegółowe rozważania zostały przedstawione we wcześniejszej pracy Autorki [2: 55].

Podczas projektowania elastycznego systemu sterowania produkcją z punktu widzenia jego efektywności należy kierować się następującymi zasadami [3: 51].

Pierwsze operacje projektowe należy powierzyć najbardziej wykwalifikowanym specjalistom, jeśli bowiem pierwsze rozwiązania decydujące o funkcjach i strukturze ESP zostaną podjęte nieprawidłowo, to nawet dalsze najlepsze prace nie zagwarantują efektywność projektu.

Wyniki kolejnych etapów projektowych należy starannie kontrolować. Na podstawie wstępnych założeń należy przeprowadzić rachunek ekonomiczny. Po zakończeniu tego etapu ponownie przeprowadza się rachunek ekonomiczny, porównując otrzymane rezultaty z pierwotnymi. Proces takich iteracyjnych rachunków powtarza się kilka razy, aż do otrzymania rezultatów o dużym stopniu pewności.

Efekty projektowania ESP zależą nie tylko od wiedzy technicznej projektanta, ale przede wszystkim od przewidywania następstw ekonomicznych proponowanych rozwiązań. Szczególnie ważny jest ekonomiczny wybór obiektu sterowania, zadania sterowania, sprzętu komputerowego oraz rozwiązań systemowych.

Wdrożenie ESP wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych. Dlatego komputeryzowany obiekt powinien posiadać pewną graniczną moc wytwórczą, by wprowadzenie ESP było opłacalne.

Komputeryzacja kompleksowa nie zawsze jest opłacalna ze względu na bardzo wysoki koszt. Stąd też komputerowi przekazuje się zazwyczaj tylko pewną część funkcji sterujących. Należy dokonać wyboru takich zadań, których komputeryzacja daje największy efekt ekonomiczny.

W kosztach wdrożenia ESP bardzo poważny udział mają nakłady na zakup sprzętu komputerowego z odpowiednim oprogramowaniem systemowym.

Dobierając sprzęt, projektant musi uwzględnić szereg wymagań. Do najważniejszych z nich należą: szybkość przetwarzania, pojemność pamięci operacyjnej, prostota obsługi i zalety ergonomiczne urządzeń komunikacji z operatorem, kompatybilność strukturalna ze sterowanymi urządzeniami technologicznymi, łatwość rozszerzenia systemu w przypadku rozbudowy mocy instalacji technologicznej, łatwość wprowadzania korekt do strategii sterowania, itp. Analiza tych wszystkich wymagań może być przeprowadzona tylko w odniesieniu do konkretnego obiektu i danego zadania sterowania.

W projektowaniu ESP można wyróżnić dwa podejścia do oceny ekonomicznej efektywności: w pierwszym – ocenia się efekt ekonomiczny, jaki teoretycznie może przynieść komputeryzacja, i następnie dobiera się sprzęt; w drugim – przyjmuje się najpierw konkretny komputer, a następnie oblicza się spodziewane korzyści ekonomiczne przy zastosowaniu tego komputera do sterowania danym procesem produkcyjnym.

Najbardziej staranny dobór sprzętu nie zagwarantuje efektywności ekonomicznej ESP, jeśli nie uwzględni się specyficznych cech organizacji procesu produkcyjnego i urządzeń technologicznych. Często należy wprowadzić zmiany w dotychczasowej organizacji procesu, aby stworzony ESP był efektywny. Wykorzystanie możliwości współczesnych komputerów do wprowadzenia nowych metodyk sterowania (np. przez przejście na sterowanie kaskadowe czy optymalizacyjne) przynosi w większości procesów znacznie większe efekty ekonomiczne niż rozwiązania klasyczne.

Podstawową zasadą ekonomicznego projektowania ESP jest modularność ich struktury, pozwalająca na łatwą wymianę i rozbudowę poszczególnych elementów składowych systemu.

Na uzyskanie efektywności systemu ma również duży wpływ częstotliwość przekazywania bieżących informacji do komputera. Zwiększenie częstotliwości przekazywania informacji o procesie pociąga za sobą zwiększone wymagania szybkości pracy komputera, a tym samym wzrost jego kosztu. W przypadku przeciwnym mogą wystąpić zakłócenia reżimu technologicznego, bądź też awarie. Stąd też wybór właściwego cyklu zbierania informacji jest podstawowym problemem technicznym, jak i ekonomicznym.

Kolejnym zadaniem metodologicznym projektowania ESS-PP jest określenie podstawowych związków oraz badanie wpływu cech technicznych na parametry ekonomiczne.

Przykładowe wyniki uzyskane w ESS-PP i przedstawione w pracy [82] są następujące:

- czas pracy systemu i czas zmiany systemu,
- koszt realizacji procesu,
- wielkość produkcji,
- nakłady na wyposażenie.

Czas pracy systemu z uwzględnieniem czasu postoju na obrabiarki określa czas eksploatacji systemu, który można przyjąć jako okres zwrotu.

Czas zmiany systemu jest miarą elastyczności technologicznej. Stosunek wielkości ekonomicznie uzasadnionych nakładów na wyposażenie kontrolno-pomiarowe do czasu ponownego uruchomienia produkcji po ustąpieniu zakłócenia można przyjąć jako miarę stabilności systemu. Im wyższa jest jakość komponentów, tym wyższy jest koszt systemu. Związki matematyczne dotyczące oceny wyposażenia mają wpływ na stopień integracji funkcjonalnej i technicznej. Szczegółowe przykłady badania tych związków zawiera praca [90].

Niezwykle ważnym zadaniem występującym w projektowaniu ESS-PP jest badanie wrażliwości modelu, dokonywane na podstawie analizy wrażliwości i ryzyka.

Poprzez analizę wrażliwości na czynniki zewnętrzne można wykazać zmiany rentowności przedsięwzięcia przy różnych wartościach przyjętych jako elementy zmienne do wyliczeń, np.:

- zmiany ceny jednostkowej,
- koszty produkcji zmienne,
- koszty produkcji stałe.

Końcowym zadaniem występującym w projektowaniu ESS-PP jest ocena niezawodności systemu.

Niezawodność systemu jest to jego zdolność do realizacji zadań w określonym czasie i określonych warunkach. Istotną miarą niezawodności systemu jest prawdopodobieństwo jego zdolności do pracy bezawaryjnej w rozpatrywanym przedziale czasu, przy czym przez bezawaryjność procesu produkcyjnego można rozumieć jego przebieg zgodny ze wzorcem, tzn. z przebiegiem ustalonym i zaplanowanym dla warunków określonych przez harmonogram. Z takim ujęciem łączy się pojęcie zakłócenia.

Zakłóceniem produkcyjnym nazwiemy zmianę własności obiektów, systemów produkcyjnych lub jego wejść, niebędących wynikiem celowego działania. Funkcję niezawodności systemu w postaci najogólniejszej możemy przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$R(T) = P(T > t).$$

Funkcja ta opisuje prawdopodobieństwo poprawnego zachowania się systemu w czasie:

$$t < T,$$

gdzie: T – czas normatywny,

t – bieżący moment czasu,

P – prawdopodobieństwo prawidłowego zachowania się systemu.

Szersze omówienie rozważanego zagadnienia zostało przedstawione w pracy [82].

Po rozwiązaniu wymienionych problemów przechodzi się do eksploatacji systemu. Integracja problemów przedstawiona w zaproponowanej strukturze metodologicznej jest podstawą zaprojektowania efektywnego elastycznego systemu produkcyjnego. Ważniejsze zasygnalizowane problemy metodologiczne wraz z aplikacjami przemysłowymi zostały przedstawione w pracach [2: 46], [3: 52].

Duże efekty o charakterze techniczno-organizacyjnym, ekonomicznym i społecznym z zastosowaniem ESP obserwuje się w krajach wysoko rozwiniętych, takich jak: Japonia, Anglia, Francja, Niemcy.

W wielu krajach rozwojowi elastycznej produkcji przypisuje się znaczenie strategiczne, traktując upowszechnienie elastycznej produkcji jako czynnik utrzymania lub wzrostu pozycji gospodarczej na arenie międzynarodowej. Wynika to z przeświadczenia, że ESP decydująco będą o efektywności gospodarowania i konkurencyjności, a także możliwości przetrwania sytuacji kryzysowych.

Przykłady zastosowań praktycznych zaprojektowanych podsystemów elastycznego systemu sterowania przebiegiem produkcji ESS-PP według zaproponowanej metodologii zostały szczegółowo opisane w pracach [30, 82–89], [2: 55].

1.7. Model ESS-PP wyrobów złożonych

Przyjęta w niniejszej pracy koncepcja elastycznego systemu sterowania przepływem produkcji stanowi próbę częściowego wyeliminowania trudności, jakie występują w konwencjonalnych systemach produkcyjnych, poprzez opracowanie odpowiednio dobranych algorytmów rozwiązań oraz zastosowanie nowej metodologii w celu uzyskania wymiernych efektów techniczno-ekonomicznych.

1.7.1. Sformułowanie problemu

W projektowaniu ESP wyróżnia się dwa podstawowe problemy:

- 1) projektowanie struktury ESP,
- 2) projektowanie systemu planowania i sterowania przepływem produkcji.

Jednym z elementów projektowania struktury ESP jest określenie rodzaju i liczby obrabiarek, środków transportowych, palet, pojemności i rozmieszczenia magazynów pośrednich, niezbędnych do realizacji zmiennych zadań produkcyjnych.

Zakres projektowania elastycznego systemu planowania i sterowania przepływem produkcji dotyczy najczęściej następujących zadań:

- 1) określenia struktury przedmiotowej wyrobu oraz stopnia jego złożoności,
- 2) określenia struktury technologicznej wyrobu i planowanie wykonania operacji poszczególnych jego elementów,
- 3) określenia elementów identycznych i podobnych w produkowanych wyrobach,
- 4) przydziału detalooperacji do stanowisk,

- 5) aktualizacji zbiorów strukturalnych i technologicznych,
- 6) określenia pracochłonności planu produkcji wyrobów,
- 7) określenia obciążenia stanowisk,
- 8) planowania zatrudnienia oraz przydziału pracowników do stanowisk,
- 9) harmonogramowania i minimalizacji łącznego czasu pracy maszyn,
- 10) planowania potrzeb materiałowych oraz ewidencji stanów i obrotów w magazynie,
- 11) określenia wartości produkcji w toku i minimalizacja kosztów,
- 12) sterowania zapasami w magazynie.

Propozycja efektywnych algorytmów rozwiązań – wraz z oprogramowaniem i częściowym wdrożeniem praktycznym – powyżej sformułowanych zadań, z zastosowaniem opisanej wcześniej metodologii, zawarta jest w pracach [82], [2: 55].

Zadania rozdziału i kolejności prac zostały rozwiązane za pomocą metod optymalizacji przybliżonej. Algorytmy są rozwiązywane na podstawie elastycznej modularnej bazy danych i stanowią integralną część informatycznego, elastycznego systemu sterowania przepływem produkcji.

Do konstrukcji algorytmów zastosowano przybliżone metody obliczeń typu heurystycznego. Rozwinięcie produkcji oparto na tzw. zapisie beznawiasowym Łukasiewicza, pozwalającym na znaczne uproszczenie i przyspieszenie podstawowych algorytmów systemu, dzięki możliwości zastosowania techniki używanej przy liczeniu wszystkich parametrów wyrobów. Prostota przyjętych rozwiązań algorytmicznych pozwala na uwzględnienie postulatu szybkiego czasu reakcji systemu na zakłócenia.

1.7.2. Struktura funkcjonalna elastycznego systemu sterowania przepływem produkcji ESS-PP

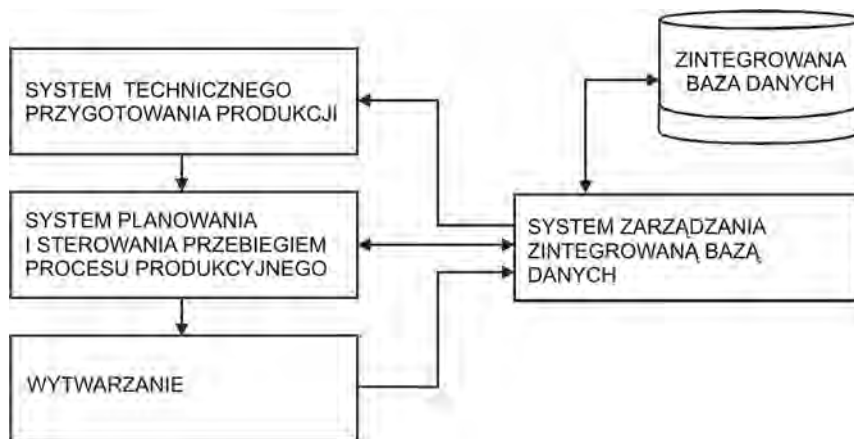
Prezentowany informatyczny system sterowania przepływem produkcji wyrobów złożonych w ESP i przyjęta w nim metodologia projektowania jest wynikiem wieloletniej działalności naukowej autorki, a jej rezultaty przedstawiono w pracach [82–87], [2: 55], [3: 51]. Koncepcje teoretyczne poszczególnych jednostek funkcjonalnych zostały praktycznie zweryfikowane w Zakładach Urządzeń Okrętowych ZUO „Hydroster” w Gdańsku. Prezentowany system daje się stosować do przedsiębiorstw przemysłu elektromaszynowego o różnej strukturze i specyfice produkcyjnej, dla produkcji zarówno małoseryjnej, jednostkowej, jak i wielkoseryjnej. Szczegółową charakterystykę omawianego przedsiębiorstwa zawiera praca [82].

Założenia systemowe i funkcje systemu

W strukturze i budowie systemu uwzględnia się następujące założenia:

- 1) programy przetwarzania oraz baza danych mają strukturę modułową (możliwość rozszerzeń),
- 2) przyjęto zmienność zbiorów danych i ich powiązań,
- 3) uwzględniono możliwość sterowania parametrami dla różnorodnych potrzeb użytkownika w celu uzyskania wielowariantowych rozwiązań w określonych warunkach produkcyjnych poprzez:
 - wybór określonych algorytmów,
 - wymianę określonych modułów programów,
- 4) zapewniono łatwość modyfikacji w zależności od potrzeb użytkownika i innych warunkowań decyzyjnych,

- 5) elementy tworzące ESS-PP – z uwagi na kolejność i ważność wykonywanych funkcji – można przedstawić w postaci wielopoziomowej hierarchicznej struktury.



Rys. 1.5. Model zintegrowanego systemu produkcji

Najniższy poziom systemu sterowania komunikuje się bezpośrednio z procesem obróbki i wykonuje większość zadań sterowania procesem.

Na poziomie pośrednim zadania przydzielone są określonym elementom systemu (obrabiarki, środki transportowe). Do tego celu wykorzystywane są informacje o stanie procesu oraz dane systemowe umieszczone w bazie danych.

Wykonywane funkcje tego poziomu wymagają krótkich czasów reakcji. Zintegrowany system produkcyjny w omawianym przedsiębiorstwie, przedstawiony na rys. 1.5, zawiera następujące jednostki funkcjonalne:

- system technicznego przygotowania produkcji,
- system planowania i sterowania produkcją,
- system wytwarzania.

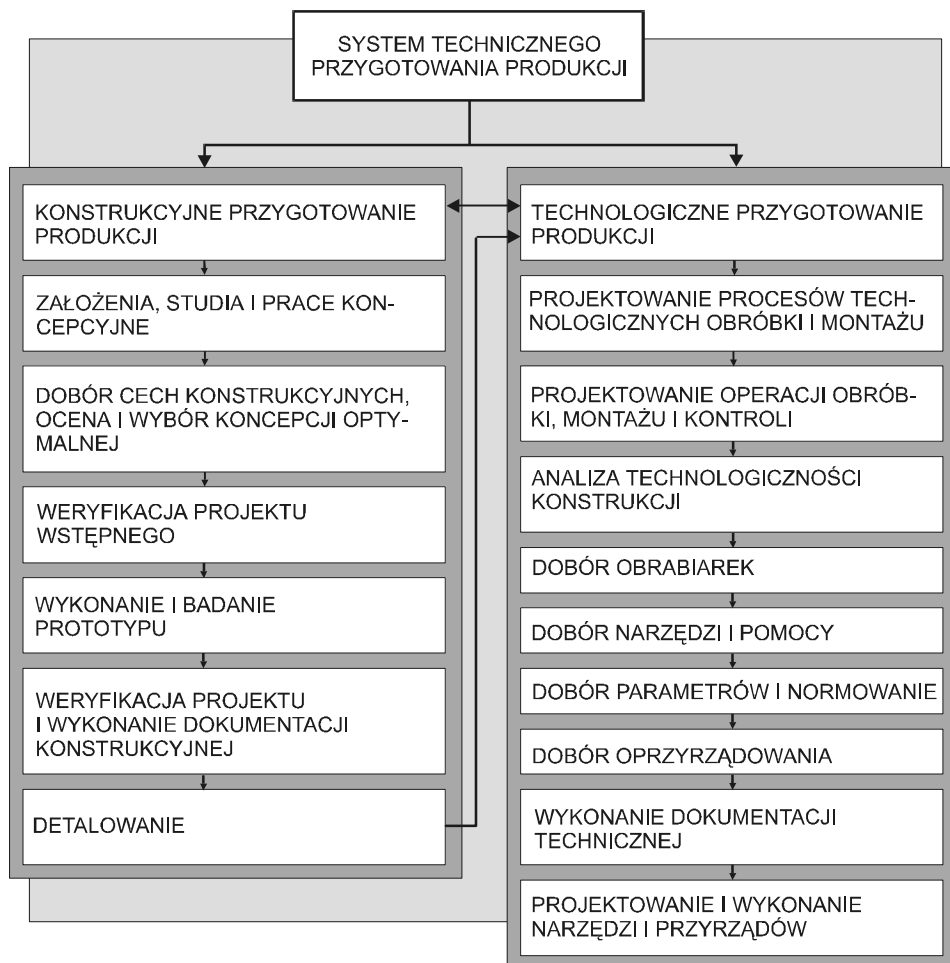
Elementy wyżej wymienionych systemów są przedstawione na rys. 1.6, 1.7, 1.8.

Podsystem sterowania przebiegiem produkcji zawiera trzy podsystemy obejmujące poszczególne agendy działalności przedsiębiorstwa. Jego strukturę przedstawiono na rys. 1.9.

Przedstawione na rys. 1.5. podsystemy są realizowane przez następujące algorytmy:

- A-1 – określenie składników bezpośrednich wyrobu (zwijanie i rozwijanie wyrobu w celu sprawdzenia poprawności listy części oraz kompletacji elementów)
- A-2 – określenie składników z przyporządkowanymi im operacjami
- A-3 – określenie stopnia złożenia wyrobu według zasięgu
- A-4 – określenie elementów identycznych i podobnych
- A-5 – modyfikacja i korekcja listy części
- A-6 – określenie czasochłonności wykonania elementów wyrobu
- A-7 – przydział załogi do stanowisk
- A-8 – przydział detalooperacji
- A-9 – wybór kolejności operacji wyrobów złożonych

- A-10 – minimalizacja łącznego czasu pracy maszyn
- A-11 – sterowanie zapasami i minimalizacja kosztów
- A-12 – określenie wartości produkcji w toku

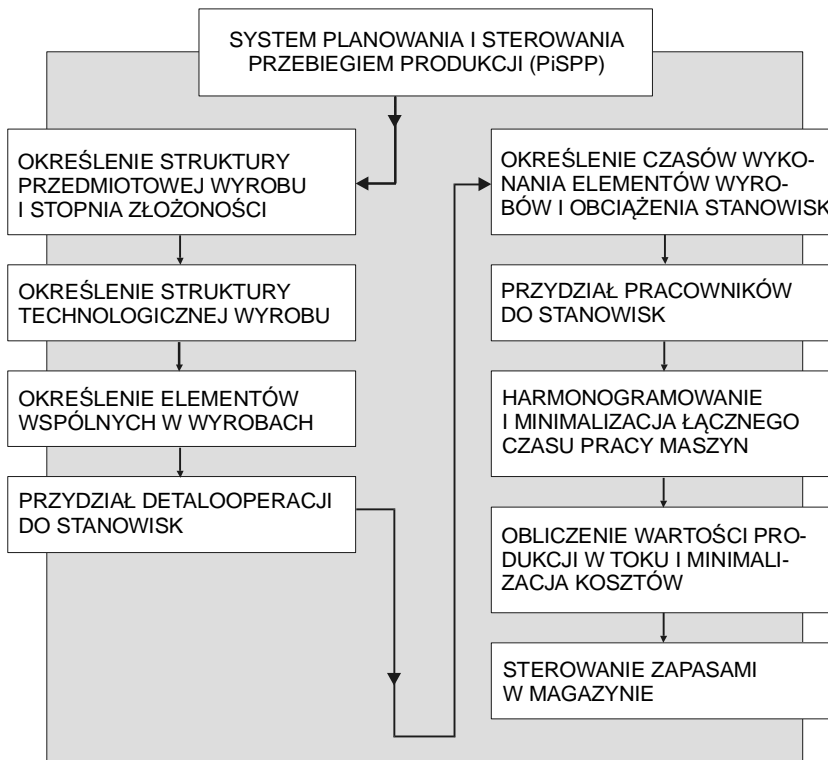


Rys. 1.6. Struktura technicznego systemu przygotowania produkcji

Programy opracowywane są na podstawie wspólnej bazy danych, zawierającej:

- listę części,
- listę operacji,
- listę materiałową,
- listę magazynową (stan materiałów w magazynie),
- listę stanowisk,
- listę załogi,
- listę narzędziową,

- listę kosztów operacyjnych,
- listę uzupełnień i poziomów zapasów.



Rys. 1.7. Struktura systemu planowania i sterowania przebiegiem produkcji

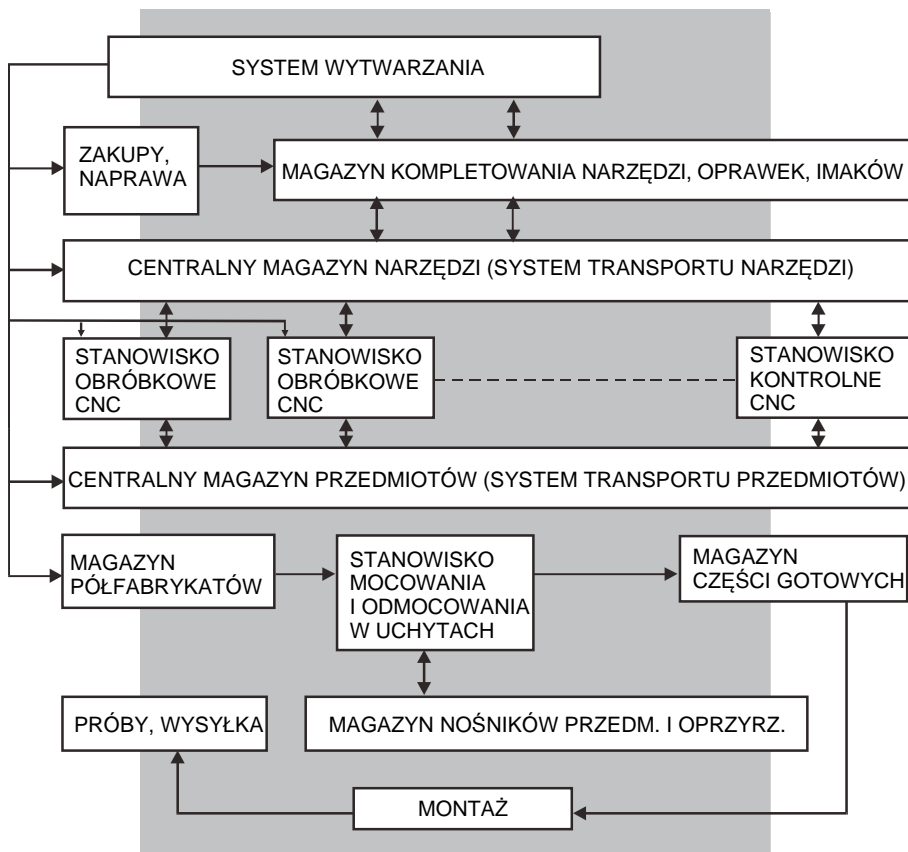
Struktura wyżej wymienionych zbiorów została przedstawiona w pracy [82].

Funkcje algorytmów, wraz ze szczegółowym ich opisem, zawierają wcześniejsze prace autorki [82–87], [3: 55].

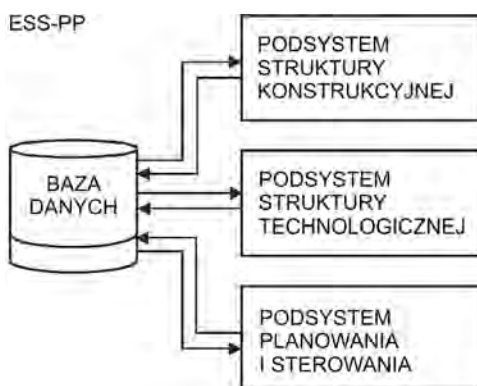
W **podsystemie struktury konstrukcyjnej** w pierwszej kolejności następuje wybór części do obróbki w ESP. Następnie sporządzany jest wykaz składników prostych i złożonych, wchodzących w skład części, oraz obliczana jest liczba składników na jeden wyrób lub serię wyrobów finalnych (według algorytmu A–1). W celu uzyskania szybkiego dostępu do poszczególnych elementów wyrobów określa się stopień złożoności wyrobu oraz poszczególnych jego składników na podstawie algorytmu (A–3). W podsystemie sporządzony jest wykaz części identycznych i podobnych wchodzących w skład jednego wyrobu, serii tych samych wyrobów, bądź wyrobów różnych (według algorytmu A–4). Bieżącej aktualizacji listy części obrabianych w ESP dokonuje się za pomocą algorytmu (A–5).

W **podsystemie struktury technologicznej** następuje przyporządkowanie poszczególnym elementom wyrobu operacji technologicznych wraz z czasami ich trwania oraz rodzajami stanowisk obróbczych przy zastosowaniu algorytmu (A–2). Ponadto określa się czas pracy

poszczególnych stanowisk lub grup stanowisk potrzebny do obróbki jednego wyrobu, serii tych samych wyrobów lub serii różnych wyrobów za pomocą algorytmu (A-6).



Rys. 1.8. Struktura systemu wytwarzania



Rys. 1.9. Struktura elastycznego systemu sterowania przebiegiem produkcji (ESS-PP)

W **podsystemie planowania i sterowania** następuje przydział detalooperacji do stanowisk wraz z obliczeniem kosztów robocizny i utrzymania stanowisk przy wykorzystaniu algorytmu (A-8). Dokonuje się również wyboru optymalnej kolejności wykonania zadań obróbkowych, przyjmując jako kryterium efektywności minimalizację łącznego czasu pracy wszystkich stanowisk. Dla ustalonej kolejności wykonania zadań następuje wyznaczenie harmonogramu pobierania materiałów z magazynu oraz przygotowania środków transportu i narzędzi. Zadania te realizuje się za pomocą algorytmów (A-9) i (A-10). W omawianym podsystemie dokonuje się również optymalizacji wartości produkcji w toku oraz wielkości zapasów wyrobów w magazynie za pomocą algorytmów: (A-11) i (A-12).

Wymienione algorytmy systemu ESS-PP zostały zrealizowane na przykładzie elastycznego systemu tokarskiego (EST), który został opisany w pracy [2: 55], natomiast w rozdziale II niniejszej pracy zostały opisane algorytmy mające zastosowanie w ISP.

Klasyfikacja problemów ESP w badaniach operacyjnych i metody ich rozwiązywania

W niniejszym rozdziale przedstawiono w syntetycznym ujęciu podstawową problematykę ESP związaną z ich projektowaniem, funkcjonowaniem oraz klasyfikacją w badaniach operacyjnych. Rozdział zawiera również przegląd wybranych metod rozwiązywania problemów szeregowania zadań o wysokim stopniu złożoności wraz z ich implementacją oraz analizą porównawczą. Szczegółowa charakterystyka modeli sterowania dyskretnymi systemami produkcyjnymi w ESP wraz z ich przeglądem monograficznym oraz przykładami zastosowań jest ujęta w pracy [55].

Formułując zadania projektowe w dziedzinie ESP należy pamiętać, że pojęcie elastyczności, chociaż nowe, odwołuje się do licznych metod i środków technicznych, technologicznych oraz organizacyjnych dawno już istniejących i służących tej elastyczności. Elementem nowości jest natomiast systemowa integracja wspomnianych metod i środków dla osiągnięcia wysokiej zdolności dostosowawczej zautomatyzowanych struktur produkcyjnych do zmieniających się zadań i zakłóceń otoczenia.

Zagadnieniem klasyfikacji problemów – z interesującego nas punktu widzenia – zajmowała się liczna grupa badaczy, w tym głównie autorzy prac: [32, 33, 35, 38, 43]. Według tych prac za podstawę klasyfikacji systemów produkcyjnych można przyjąć, między innymi, sposób tworzenia zleceń i wytwarzania. Podczas tworzenia zleceń wyróżnia się **systemy otwarte**, w których zlecenia wykonania operacji produkcyjnych są tworzone w celu zaspokojenia aktualnych zapotrzebowań klientów, oraz **systemy zamknięte**, w których zlecenia te są tworzone w celu uzupełnienia magazynów wyrobów gotowych. **Dla ESP charakterystyczny jest sposób tworzenia zleceń otwartych.**

Przy wytwarzaniu sytuacja jest nieco bardziej złożona. **Wyróżnia się tu systemy wytwarzania ciągłego**, charakterystyczne dla produkcji wielkoseryjnej i małosortymentowej, oraz **systemy wytwarzania w partiach**, typowe dla produkcji małoseryjnej i wieloasortymentowej.

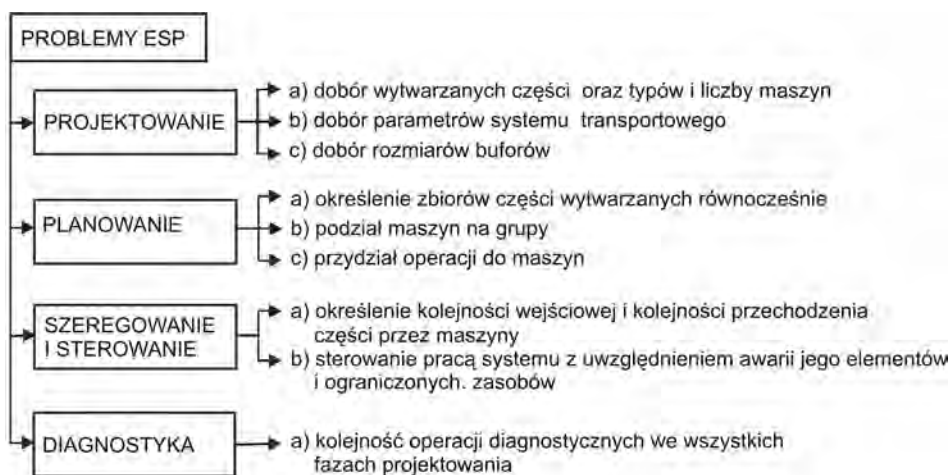
W pracy¹⁾ autorzy prezentują nowe podejście do weryfikacji zleceń produkcyjnych dla wieloasortymentowej produkcji rytmicznej w warunkach istniejących ograniczeń logistycznych. Istotą weryfikacji zleceń jest sprawdzenie warunków wystarczających, gwarantujących spełnienie określonych parametrów charakteryzujących sposób przyjęcia nowego zlecenia do realizacji. Przyjęte zlecenie w wyniku weryfikacji daje pewność terminowej jego realizacji oraz gwarantuje niezakłócony przebieg realizacji zleceń dotychczas wykonywanych w systemie. Kolejne zlecenie jest przyjmowane do realizacji wówczas, gdy spełnia oczekiwania klienta pod względem terminowości realizacji i jednocześnie gwarantuje

¹⁾ Gattnev D., Saniuk S., Skołod B.: Zarządzanie przepływem wieloasortymentowej produkcji rytmicznej w warunkach ograniczeń logistycznych. Warszawa: Pomiar – Automatyka – Robotyka, nr 4, 2000.

możliwe wysokie wykorzystanie zasobów systemu produkcyjnego.

Dla ESP charakterystyczny jest sposób wytwarzania w partiach. W teorii szeregowania zadań systemom z przetwarzaniem ciągłym odpowiada model przepływowy (ang. *job chop*). ESP – stanowiące zbiory uniwersalnych, numerycznie lub komputerowo sterowanych obrabiarek, połączonych ze zautomatyzowanymi systemami transportu materiałów, winny łączyć dużą elastyczność systemów wytwarzania w partiach z wysoką przepustowością systemów wytwarzania ciągłego.

Na podstawie wielu prac, w tym szczególnie [14, 19], można przyjąć klasyfikację problemów związanych z projektowaniem i funkcjonowaniem ESP, przedstawioną na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Klasyfikacja problemów ESP w badaniach operacyjnych

Wyszczególnione na rysunku zagadnienia zostały sformułowane bardzo ogólnie, w każdym z nich można wyróżnić szereg zadań szczegółowych.

Dalej opiszemy przedstawione problemy w wymienionych agendach działalności przedsiębiorstwa.

2.1. Problemy projektowania ESP w badaniach operacyjnych

Dobór wytwarzanych części, typów i liczby maszyn przy zastosowaniu modeli i metod badań operacyjnych winien być poprzedzony kilkoma decyzjami wstępnymi. Po pierwsze, spośród wszystkich typów części wytwarzanych w danym przedsiębiorstwie przemysłowym należy wybrać podzbiór tych, które będą wytwarzane lub montowane w ramach ESP. W następnej kolejności, w celu oszacowania wymagań funkcjonalnych i czasowych niezbędnych do wykonania wybranego zbioru części, należy zdefiniować proces technologiczny wytwarzania każdego typu części (typy maszyn, narzędzi, np. skrawających dla poszczególnych operacji, parametry skrawania, czasy realizacji operacji, ograniczenia kolejnościowe itp.). Po wykonaniu omawianych zadań wstępnych można sformułować na drodze programowania dyskretnego zagadnienie doboru liczby maszyn poszczególnych

typów i wykonywanych przez nie części.

Zagadnienie to można rozwiązywać na różnym poziomie szczegółowości; można np. dobierać również liczby uchwytów mocujących, poszczególnych typów i narzędzi skrawających.

W pracy [44] sformułowano problem doboru maszyn i części na drodze programowania dyskretnego i zaproponowano do jego rozwiązania dwa algorytmy przybliżone. Pierwszy z nich, PAMS, określa liczby maszyn i pierwsze przybliżenie liczb części. Drugi, zwany PARSE, sekwencyjnie ulepsza dobór części.

Przykład algorytmu wyboru detali do obróbki w ESP został zawarty w pracy autorki [1: 82], natomiast w publikacji [48] przedstawiono model decyzyjny CA–VS doboru liczby maszyn poszczególnych typów i palet. Według tego modelu poszukuje się takiej liczby maszyn poszczególnych typów i palet, która zminimalizuje jednostkowe koszty zmienne i zapewni minimalną, wymaganą liczbę wykonywanych części w jednostce czasu. Do rozwiązania tego modelu proponowana jest wielostanowa procedura podana przez Dallera i Freina. Zadanie doboru wyposażenia sprzętowego zostało również sformułowane w pracy [53], jako problem programowania całkowitoliczbowego. Funkcją celu podlegającą zminimalizowaniu jest koszt zakupu maszyn i środków transportu oraz koszt produkcji przy zastosowaniu tego wyposażenia. Ograniczenia zapewniają wykonanie wszystkich operacji obróbki, montażu i transportu oraz zabezpieczają przed przekroczeniem dysponowanych czasów maszyn i dysponowanego budżetu, w przypadku wcześniejszego doboru liczby maszyn lub środków transportu.

Zadanie dotyczące wyboru drugiej grupy urządzeń przyjmuje formę uproszczoną.

Kolejnym zadaniem w procesie projektowania jest dobór parametrów systemu transportowego. Problem ten w postaci ogólnej obejmuje wybór urządzeń transportowych (suwnic, przenośników taśmowych, wózków sterowanych automatycznie itp.) i manipulacyjnych (robotów przemysłowych). Celem projektowania systemu transportowego jest określenie:

- rodzaju i liczby stosowanych środków transportowych,
- wielkości przewożonych ładunków między poszczególnymi punktami w określonym czasie,
- odległości transportowych i czasów trwania transportu po określonych trasach.

Funkcje celu przy projektowaniu systemu transportowego związane są z minimalizacją kosztów transportu oraz czasów jego trwania, długości dróg transportowych, liczby operacji transportowych itp. Zagadnienia te są przedstawione w dość licznej literaturze, m. in. [1: 29], [10, 32]. Z punktu widzenia badań operacyjnych, podstawowe problemy związane z optymalizacją systemu transportowego w ESP, to dobór liczby automatycznie sterowanych wózków i reguł sterowania nimi.

W pracy [32] przedstawiono dwuetapowy algorytm. W pierwszym etapie określa się minimalną niezbędną liczbę wózków, bez uwzględniania przeciążeń tras i innych ograniczeń, rozwiązując w tym celu problem transportowy przy kryterium liczby pustych przebiegów. W drugim etapie algorytm generuje liczbę marszrut niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania systemu. Przydziału wózków do marszrut dokonuje się według reguły heurystycznej, przydzielającej wyższy priorytet do krótszej marszrut.

Bada się następnie ewentualną poprawę rozwiązań na drodze zamiany i porównywania parami. Problem doboru reguł sterowania wózkami ujęto w pracy [10]. Dokonano podziału tych reguł na te, które są inicjowane przez stanowiska robocze (jeśli można wybierać spośród wózków), oraz takie, które są inicjowane przez wózki (gdy szereg stanowisk robo-

czych ubiega się o obsługę). W wyniku badań symulacyjnych stwierdzono, że dla dłuższych przepływów materialnych korzystniejsze są reguły inicjowane przez wózki.

Kolejnym zadaniem jest dobór liczby palet, który wiąże się z maksymalną liczbą części w systemie i jego obciążeniem.

Następne zagadnienie związane jest z problemem doboru rozmiaru buforów, rozumianych jako miejsce dla zapasów wewnątrzsystemowych. Możliwe są rozwiązania z zastosowaniem buforu centralnego, buforów lokalnych przy poszczególnych stanowiskach, kombinacji buforu centralnego i buforów lokalnych, bądź też rozwiązania bez buforów.

Wpływ rozmiarów buforów na funkcjonowanie ESP badano w kilku pracach [2, 9, 12]. W pracy [12] zastosowano podejście asymetrycznego zachowania się wydajności ESP w funkcji dopuszczalnego poziomu zapasu. W pracy [2] rozpatrywano problem doboru buforów, uwzględniając łagodzenie wpływu awarii maszyn, natomiast w pracy [9] wykazano przewagę rozwiązania z centralnym buforem nad rozwiązaniem z buforami lokalnymi. Do rozwiązania zagadnień doboru buforów należy określić ich wielkość. W pracy [1: 51] opisane zostały typy blokowania systemu z zastosowaniem buforów o ograniczonych rozmiarach oraz możliwości zapobiegania blokowaniu z wykorzystaniem klasycznego modelu kolejek KMK (ang. *Classical Dosed Queuing Network Model*).

2.2. Problemy planowania

Do zadań planowania, zgodnie z autorami prac [1: 27, 50], można zaliczyć wybór części produkowanych równocześnie (partii produkcyjnej), grupowanie maszyn, przydział zasobów do realizacji zadań i przydział operacji do maszyn.

Zagadnienie określenia zbiorów części wytwarzanych równocześnie i przydziału operacji do stanowisk (maszyn) mają podstawowe znaczenie dla efektywności ESP w zakresie planowania, natomiast problem grupowania stanowisk, rozpatrywany przez niektórych autorów, ma raczej znaczenie drugorzędne; jego dobre rozwiązanie może jednak przyczynić się do zwiększenia efektywności ESP. Na podstawie pracy [2] daje się zauważyć, że w wyniku grupowania części występuje pewna sprzeczność między etapem projektowania a etapem planowania ESP. O ile bowiem na etapie projektowania grupowanie części osiąga się na podstawie ich podobieństw, o tyle na etapie planowania maksymalizacja stopnia wykorzystania stanowisk, a ogólnie przepustowość ESP, narzuca grupowanie części o komplementarnych żądaniach wykonawczych.

W [33] podjęto próbę rozwiązania tego dylematu, tworząc w specjalny sposób „wiązki” części. Natomiast w pracy [44] zaproponowano sekwencyjną procedurę, w której części są umieszczone na liście w kolejności malejących „prawdopodobieństw pomyślnego wyniku”. Jest to wskaźnik dopuszczający wykonywanie części o małych rezerwach czasowych na różnych maszynach i przyczyniający się do równomiernego obciążenia maszyn. Należy jednak zauważyć, że równomierne obciążenie stanowisk nie zawsze jest optymalne, jeśli brać pod uwagę przepustowość systemu. Przykładowo, w pracy [40] wykazano istnienie takiej optymalności, w której każda operacja przydzielona jest tylko do jednej maszyny.

W [45] stwierdzono, że równomierne obciążenie maszyn prowadzi do stochastycznej minimalizacji zapasów wewnątrzsystemowych; w pracy [32] badano wpływ nierównomierności obciążenia maszyn na przepustowość ESP, stosując jego model w postaci zamkniętej sieci kolejkowej. Pokazano, że w ogólności przepustowość systemu jest maksymalizowana przez grupowanie maszyn i większe obciążenie poszczególnych maszyn

w większych grupach. Zwrócono również uwagę na inne zalety grupowania maszyn, polegające na zwiększeniu liczby dopuszczalnych marszrut oraz na zmniejszeniu wpływów awarii. W pracy [37] zaproponowano hierarchiczne podejście do rozwiązania problemu grupowania stanowisk i przydziału operacji do stanowisk. Na wyższym poziomie następuje maksymalne grupowanie maszyn, z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych, po czym przydziela się obciążenie do grup maszyn w zależności od ich liczebności. Na poziomie niższym formuluje się zagadnienie programowania całkowitoliczbowego dla znalezienia minimalnej liczby grup stanowisk i optymalnego przydziału operacji do stanowisk, przy następujących kryteriach:

- równomierności obciążenia stanowisk lub ich grup,
- minimalnej liczby przemieszczeń części między stanowiskami.

Wymienione kryteria rozpatrywano również w [38], gdzie podano algorytmy przybliżone dla każdego z nich.

Przydział operacji do maszyn polega na przypisaniu określonym grupom maszyn określonych operacji i zasobów niezbędnych do wykonania tych operacji.

W [52] sformułowano problem przydziału operacji do stanowisk – na drodze programowania całkowitoliczbowego – rozwiązując go metodą dekompozycji równań Lagrange'a, a jako kryterium optymalizacji przyjęto równomierność obciążenia.

W pracy S. Lisa²⁾ problem wyboru zbioru części produkowanych równocześnie został sformułowany również jako zadanie programowania dyskretnego. W wyniku wykonania algorytmu wydzielonych zostaje dokładnie n podzbiorów części, a każda część jest przydzielona tylko do jednego, niepustego podzbioru. Również jako zadanie programowania dyskretnego, w pracy [1: 80] został opisany problem grupowania maszyn. Łączenie maszyn w grupy zależy od pojemności magazynu narzędziowego maszyny i wyposażenia w różne typy narzędzi. W wyniku wykonania procedury, dla każdej operacji wyznacza się zbiór maszyn, na których operacja ta może być wykonana. Inne podejście do rozwiązania niniejszego zagadnienia zawiera praca [3:1].

W celu wyodrębnienia podmacierzy można stosować metody macierzowe i taksonomiczne. Przykładowy algorytm obliczenia liczby palet i narzędzi niezbędnych do obróbki detali przedstawiony został w pracy [55].

W pracy [1: 50] przedstawiono model programowania dyskretnego, który zapewnia podział zbioru wszystkich części na minimalną liczbę partii produkcyjnych. Problem ten może być również przybliżony prostszym zadaniem maksymalizacji liczby typów części w każdej kolejnej operacji. W pracy [1: 64] poszukiwanie partii produkcyjnej odbywa się przy minimalizacji liczby partii produkcyjnych, minimalizacji rozpiętości wykonawczej poszczególnych elementów partii lub takiego bieżącego przydziału części do partii produkcyjnej, by zrównoważyć obciążenie poszczególnych maszyn. Podany binarny liniowy model SEF – HWANGA minimalizuje liczbę partii przez maksymalizację liczby typów części zawartych w partii. Do rozwiązania tego modelu można zastosować m. in. heurystyczną procedurę iteracyjną SEF – KUCHNA, według której nowe części są dopóty dołączone do partii, dopóki magazyn narzędziowy maszyny pomieści dodatkowe narzędzie. Praca [1: 50] zawiera model rozdziału operacji pomiędzy maszyny, który zapewnia minimalną długość okresu wykonania partii produkcyjnej. Do zrównoważenia obciążeń maszyn stosowane są metody heurystyczne, wykorzystujące reguły najdłuższego czasu wykonania operacji (LPT), lub najwcześniejszego czasu ukończenia operacji (ECT).

²⁾ Lis S.: Podstawy projektowania systemu rytmicznej produkcji. Warszawa: PWN 1978.

Problem przydziału operacji do maszyn przedstawiono również w pracy [1: 64]. Rozważane są tam modele przydziału operacji do maszyn, bez uwzględnienia warunku ograniczonej pojemności magazynu narzędziowego, z uwzględnieniem tego warunku i z uwzględnieniem warunku, że te same narzędzia mogą być wykorzystywane do różnych operacji.

Kryterium optymalności w tych modelach stanowi minimalizacja kosztów produkcji w sytuacji, gdy ta sama operacja może być wykonywana przez różne maszyny wykorzystujące narzędzia o różnych cenach, minimalizacja największego obciążenia maszyn, gdy operacje mają różne czasy wykonania na identycznych maszynach lub minimalizacja niezbędnych narzędzi.

Przydział operacji do maszyn ustala w sposób jednoznaczny marszrutę technologiczną. Zadanie przydziału operacji do maszyn może być formułowane jako problem wyznaczenia optymalnego zestawu marszrut do wybranej partii części. W pracy [1: 50] przedstawiono zadanie optymalizacji zestawu marszrut dla wybranej partii produkcyjnej. Celem zadania jest minimalizacja łącznego czasu przepływu przez system wszystkich części partii produkcyjnej, przy zapewnieniu obróbki wszystkich części i nieprzekroczeniu dysponowanego czasu produkcyjnego.

2.3. Problemy szeregowania i sterowania

Zagadnienia szeregowania i sterowania stanowią liczną klasę problemów związanych z optymalizacją funkcjonowania elastycznych systemów produkcyjnych (ESP). W ogólności są to problemy szeregowania z uwzględnieniem ograniczonych zasobów i awarii poszczególnych elementów systemu. Specyfika tych zagadnień polega, między innymi, na istnieniu wielu maszyn poszczególnych typów, wielu możliwych marszrut dla poszczególnych typów, części i na konieczności uwzględnienia czasów transportu. Szeregowanie w ESP jest zadaniem skomplikowanym z uwagi na złożoność struktur procesów technologicznych i produkcyjnych oraz na konieczność uwzględnienia takich elementów, jak narzędzia, palety, uchwyty mocujące, bufory międzyoperacyjne itp.

W zależności od organizacji produkcji, realizowanej w danym systemie, można wyróżnić następujące typy zagadnień związanych z problemem szeregowania i sterowania:

- zagadnienia przepływowe (taśmowe), w których każde zadanie w procesie produkcji przemieszczane jest wzdłuż tej samej marszrut technologicznej obejmującej wszystkie stanowiska systemu,
- permutacyjne zagadnienia przepływowe, w których dodatkowo kolejność wykonania wszystkich zadań jest taka sama na wszystkich maszynach,
- zagadnienia gniazdowe, w których różne zadania mogą być wykonywane według różnych marszrut technologicznych,
- zagadnienia z równoległymi maszynami, w których każde zadanie może być wykonywane na dokładnie jednej z kilku równoległych maszyn.

Do rozwiązywania tych problemów, oprócz metod dokładnych, można stosować metody przybliżone [3, 8, 13, 17, 24, 25, 41, 51] oraz oparte na metodach sztucznej inteligencji [3: 1], [22, 23, 25, 27, 28]. Poniżej przedstawimy kilka prac, w których starano się uwzględnić niektóre cechy specyficzne ESP.

W pracy [3] przedstawiono podejście hierarchiczne, uwzględniające awarie maszyn, dla kryterium w postaci czasu wykonania partii (serii). Czas ten podzielono na odcinki odpowiadające stanom awaryjnym systemu. Na pierwszym, wyższym poziomie algorytmu, określa się zestaw części oraz ich marszrutę w efekcie rozwiązania nieliniowego problemu

programowania matematycznego (nieliniowość wynika z ograniczenia dostępnej liczby palet i uchwytów mocujących oraz maksymalnej liczby części w systemie w danej chwili).

Do sformułowania tego problemu jest wymagana znajomość średnich czasów oczekiwania i wykonywania poszczególnych części na poszczególnych maszynach. W celu ich estymacji wykorzystuje się analizę wartości średniej.

Na drugim poziomie określa się kolejność wejściową, to znaczy kolejność, w jakiej części pojawiają się na wejściu systemu, a na trzecim – podejmuje się decyzję o wyborze następnej części do obróbki, spośród części oczekujących na daną maszynę.

Podejście hierarchiczne do rozwiązania problemu szeregowania – z uwzględnieniem awarii – prezentuje wielu innych autorów [1, 3, 12, 19, 20]. Wykorzystują oni – na pierwszym poziomie – sformułowanie problemu sterowania przepływem w celu określenia najkorzystniejszych wielkości produkcji w każdym stanie awaryjnym.

W funkcji kryterialnej uwzględnia się aktualny stan systemu oraz koszty przyspieszeń i opóźnień poszczególnych części.

Na niższych poziomach określa się kolejność wejściową i marszruty części, zapewniające osiągnięcie wielkości produkcji wyznaczonych na wyższym poziomie.

W pracy [23] zaproponowano inne podejście, wiążąc rozwiązanie problemu szeregowania z wcześniejszym rozwiązaniem problemu określenia zdolności produkcyjnej ESP. Rozwiązanie tego drugiego problemu wyznacza koszt wykorzystania maszyn, który z kolei jest zmniejszany obok kosztu opóźnień operacji przez wybór odpowiednich reguł szeregowania. Zaproponowano regułę, która wybiera następną operację dla każdej maszyny wg priorytetu uwzględniającego koszt opóźnienia, gdy następna operacja jest opóźniona.

W pracy [1: 51] przedstawiona została heurystyka RITM, służąca do uszeregowania zadań w elastycznej linii montażowej. Celem tej heurystyki jest minimalizacja czasu montażu wszystkich wyrobów przez przydzielenie ich do maszyn z najwcześniejszymi czasami dostępności i jednoczesna minimalizacja całkowitego czasu przestoju maszyn.

Do szeregowania zadań można zastosować również **algorytmy genetyczne** [18, 21]. W tych algorytmach na ogół kompletne rozwiązanie problemu musi być przetworzone na ciągi binarne. W wygenerowanej losowo populacji ciągów kodowych oblicza się przystosowanie każdego ciągu, czyli wartość funkcji celu, i na tej podstawie wyznacza się prawdopodobieństwo wejścia danego ciągu do populacji pośredniej, w której odbywa się krzyżowanie.

Krzyżowanie polega na losowym wyborze (stosowana jest tutaj metoda koła ruletki) par ciągów oraz jednego, lub kilku miejsc krzyżowania i zamianie części kodu między ciągami w parze. Do zapoczątkowania poszukiwania nowych obszarów przestrzeni stanów stosowana jest mutacja, polegająca na zamianie wartości na poszczególnych pozycjach ciągów kodowych. Ten proces ewolucji służy do znalezienia osobników najlepiej przystosowanych i umożliwienia ich reprodukcji. Poszukiwanie optymalnego uszeregowania zadań odbywa się niejako przy okazji, dzięki właściwemu sformułowaniu funkcji oceny i przystosowania.

Przedstawione zagadnienia nie wyczerpują całości problematyki ESP, niemniej jednak ESP – biorąc pod uwagę złożoność problematyki – stanowią najbardziej zaawansowany typ systemów technicznych; w aspekcie badań operacyjnych specyfika ESP polega, ogólnie mówiąc, na tym, że problemy związane z ich projektowaniem i funkcjonowaniem występują w najbardziej ogólnej postaci, przy czym mamy do czynienia z dużą różnorodnością tych problemów i powiązań między nimi.

Do rozwiązywania problemów ESP są stosowane następujące podstawowe modele:

- symulacyjne,
- programowania całkowitoliczbowego,
- programowania dynamicznego,

- masowej obsługi,
- analizy wartości,
- sieci Petriego,
- metody sztucznej inteligencji.

Problemami kolejek zajmowali się m. in. J. Buzacott, A. Yao, D. David [6], natomiast przeglądu innych modeli do rozwiązywania zagadnień ESP podjęli się: J. Solberg i J. James [31].

Opis szczegółowy wymienionych modeli z licznymi przykładami zastosowań zawiera ją m. in. prace [1: 24, 55], [3: 1].

Poniżej zostaną opisane wybrane algorytmy szeregowania zadań mających zastosowanie w elastycznych dyskretnych heurystycznych systemach sterowania produkcją (EDSSP).

2.4. Przegląd wybranych metod heurystycznych oraz metod inteligencji obliczeniowej rozwiązywania problemów harmonogramowania w ESP

2.4.1. Metody heurystyczne

Klasyfikacja metod heurystycznych wyróżnia dwie zasadnicze grupy algorytmów: algorytmy jednokrotne oraz algorytmy wielokrotne (przeszukiwania sąsiedztwa). Istotą działania heurystycznych algorytmów jednokrotnych jest wyznaczenie terminu rozpoczęcia każdej z operacji, który raz ustalony nie ulega zmianie podczas działania algorytmu. Algorytmy wielokrotne natomiast dopuszczają możliwość modyfikacji terminu rozpoczęcia operacji wcześniej włączonych do harmonogramu. Modyfikacja ta może dotyczyć zarówno opóźnienia, jak i przyspieszenia terminu wykonania operacji lub grupy operacji. Algorytmy wielokrotne, potencjalnie charakteryzujące się większą elastycznością, mogą prezentować rozwiązania gorzej optymalizujące wybrane kryterium oceny harmonogramu. Efektywność wykorzystania algorytmu klasyfikowanego jako jednokrotny lub wielokrotny jest wysoce zależna od klasy rozwiązywanego problemu.

2.4.1.1. System dyspozytorski tworzący harmonogramy bez opóźnień

Fundamentalną cechą systemu dyspozytorskiego, należącego do klasy algorytmów heurystycznych jednokrotnych, jest metodologia tworzenia harmonogramu. Terminy rozpoczęcia operacji dla każdej maszyny definiowane są w porządku rosnącym, czyli w takim porządku, w jakim będą one wykonywane. Tak więc operacja wstawiana jest zawsze na końcu kolejki operacji przeznaczonych do realizacji na danej maszynie. Istotnym ograniczeniem jest brak możliwości wstawiania operacji do harmonogramu w najwcześniejszym możliwym terminie, bez naruszania ograniczeń technologicznych oraz przesuwania operacji o ustalonym uprzednio terminie rozpoczęcia.

Systemy dyspozytorskie tworzące harmonogramy bez opóźnień termin realizacji kolejnej operacji wyznaczają zgodnie z poniższym kryterium [35]:

$$\delta^* = \min_k \min_{j \in \{S_{so}^k\}} [\max(C_k, s_{jk})] \quad (k = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n). \quad (2.1)$$

Przyjęte oznaczenia w zależności (2.1) oraz w niżej opisanym algorytmie mają następujące znaczenie:

- $\{S_{so}^k\}$ – zbiór operacji oczekujących na ustalenie terminu wykonania na maszynie k , których wszystkie operacje poprzedzające zostały umieszczone w harmonogramie,
- $\{S_{ip}^k\}$ – zbiór operacji, których termin wykonania na maszynie k został ustalony,
- $\{S_{no}^k\}$ – zbiór operacji oczekujących na ustalenie terminu wykonania na maszynie k , których nie wszystkie operacje poprzedzające zostały umieszczone w harmonogramie,
- C_k – najpóźniejszy termin zakończenia operacji należącej do $\{S_{ip}^k\}$,
- s_{jk} – najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia operacji j ze zbioru $\{S_{so}^k\}$,
- m – liczba maszyn,
- n – licznosc zbioru $\{S_{so}^k\}$.

System dyspozytorski działa według następującego algorytmu [32].

1. Wyznacz operacje należące do zbioru $\{S_{so}^k\}$ dla każdej maszyny k .
2. Wyznacz dla każdej operacji ze zbiorów $\{S_{so}^k\}$ minimalny możliwy termin rozpoczęcia równy $\max(C_k, s_{jk})$.
3. Wyznacz dla każdego zbioru $\{S_{so}^k\}$ minimalny termin rozpoczęcia operacji

$$\min_k \min_{j \in \{S_{so}^k\}} [\max(C_k, s_{jk})].$$

4. Wyznacz minimalny termin rozpoczęcia operacji dla wszystkich maszyn

$$\delta^* = \min_k \min_{j \in \{S_{so}^k\}} [\max(C_k, s_{jk})].$$

5. Wybierz operację, która może rozpocząć się w momencie δ^* i przenieś tę operację ze zbioru $\{S_{so}^k\}$ do zbioru $\{S_{ip}^k\}$.
6. Jeżeli nie wszystkie zbiory $\{S_{so}^k\}$ oraz $\{S_{no}^k\}$ są puste, przejdź do kroku 1.
7. Zakończ.

2.4.1.2. Procedura wspinania na szczyt

Procedura wspinania na szczyt należy do klasy algorytmów heurystycznych przeszukiwania sąsiedztwa (wielokrotnych), tak więc odmiennie od systemu dyspozytorskiego raz ustalony termin realizacji danej operacji może ulec zmianie w trakcie działania algorytmu. Ideą działania algorytmów wielokrotnych jest stwierdzenie, że poszukiwanie rozwiązania optymalnego można rozpocząć od dowolnego rozwiązania dopuszczalnego przez przeszukiwanie rozwiązań sąsiednich, powstałych poprzez dokonanie pewnych modyfikacji w rozwiązaniu bieżącym. Oczywiście taka metodologia postępowania może prowadzić do wyznaczenia rozwiązań reprezentujących minima lokalne, co jest najpoważniejszą wadą tych algorytmów. Ponadto należy zaznaczyć, iż procedura wspinania na szczyt jest algorytmem niedeterministycznym, to znaczy takim, który dla tych samych danych wejściowych może zaprezentować dwa zupełnie różne rezultaty. Niedeterminizm tego algorytmu wynika bezpośrednio z losowego charakteru wyboru początkowego rozwiązania dopuszczalnego oraz równie losowego charakteru generatora rozwiązań sąsiednich.

Metoda generowania rozwiązania sąsiedniego może być dowolną, spełniającą podstawowe cechy charakterystyczne sąsiedztwa, modyfikacją rozwiązania bieżącego, czyli między innymi cechuje się wysokim stopniem korelacji pomiędzy rozwiązaniem bieżącym i sąsiednim oraz dopuszczalnością rozwiązania sąsiedniego. Najczęściej wykorzystywaną modyfikacją pozwalającą na wyznaczenie rozwiązania sąsiedniego jest zmiana kolejności wykonywania jednego lub większej liczby zleceń.

Procedurę wspinania na szczyt można opisać następującym algorytmem [28].

1. Wygeneruj dopuszczalne rozwiązanie losowe H .
2. Wygeneruj zbiór rozwiązań sąsiednich $\{H\}$ dla danego rozwiązania bieżącego H .
3. Usuń ze zbioru $\{H\}$ rozwiązania gorzej minimalizujące założone kryterium oceny harmonogramu w porównaniu z rozwiązaniem bieżącym H .
4. Jeżeli $\{H\} \neq \emptyset$, zastąp rozwiązanie bieżące H jednym z rozwiązań ze zbioru $\{H\}$ i przejdź do kroku 2.
5. Zakończ.

Powszechnie wykorzystywaną metodą wyboru nowego rozwiązania bieżącego ze zbioru $\{H\}$ jest wybór pierwszego rozwiązania sąsiedniego lepiej minimalizującego założone kryterium oceny harmonogramu w porównaniu z rozwiązaniem bieżącym H .

2.4.1.3. Symulowane wyżarzanie

Koncepcja symulowanego wyżarzania jest zbliżona do procedury wspinania na szczyt, jednakże korzysta z mechanizmu potencjalnie pozwalającego na wyeliminowanie największej wady tej procedury, objawiającej się częstym wyznaczaniem rezultatów reprezentujących minima lokalne. Idea symulowanego wyżarzania została zaczerpnięta bezpośrednio z termodynamiki i metalurgii, gdzie zaobserwowano, że płynna stal schładzana wystarczająco wolno ma tendencję do krzepnięcia w strukturze o minimalnej energii.

Algorytm symulowanego wyżarzania w przeciwieństwie do procedury wspinania na szczyt wybiera rozwiązanie H' spośród rozwiązań sąsiednich w sposób losowy, i jeżeli $f(H') \leq f(H)$, to H' staje się rozwiązaniem bieżącym H , natomiast w odmiennym przypadku H' staje się rozwiązaniem bieżącym z prawdopodobieństwem $p(k)$ danym wzorem [32]:

$$p(k) = \min \left(1; \exp \left(\frac{-(f(h') - f(H))}{T_k} \right) \right), \quad (2.2)$$

gdzie T_k jest współczynnikiem określonym mianem temperatury, przyjmującym malejące wartości w kolejnych iteracjach, zgodnie z harmonogramem schładzania:

$$T_k = \alpha^{[n/\beta]} T_0, \quad n < p(k), \quad (2.3)$$

gdzie: α – współczynnik schładzania o wartościach z przedziału $[0; 1]$, określający dynamikę spadku temperatury,

β – współczynnik definiujący liczbę iteracji, co którą obniżana jest temperatura,

T_0 – temperatura początkowa,

n – losowo wygenerowana liczba z przedziału $[0; 1]$.

Wyznaczanie prawdopodobieństwa $p(k)$ w każdej iteracji algorytmu pozwala na częściowe pogorszenie oceny bieżącego rozwiązania H poprzez przyjęcie rozwiązania gorzej minimalizującego założone kryterium oceny harmonogramu. Prawdopodobieństwo przyjęcia rozwiązania gorszego jako rozwiązania bieżącego maleje w kolejnych iteracjach wraz ze spadkiem temperatury. Należy także zaznaczyć, iż wartość prawdopodobieństwa $p(k)$ jest silnie zależna od wartości oceny rozwiązań H oraz H' . W przypadku znacznych dysproporcji w ocenie na niekorzyść rozwiązania H' , prawdopodobieństwo to przyjmuje niskie wartości, natomiast gdy oceny są zbliżone, wartość prawdopodobieństwa w początkowych iteracjach jest wysoka. Dzięki powyższemu mechanizmowi algorytm symulowanego wyżarzania w początkowej fazie działania jest zdolny do opuszcza-

nia lokalnego minimum, aby w końcowej fazie koncentrować się na wyznaczeniu wartości zbliżonej do optymalnej.

Wartość temperatury początkowej T_0 należy dobrać w taki sposób, aby początkowe wartości prawdopodobieństwa $p(k)$ oscylowały w granicach wartości z przedziału $[0,5; 0,9]$. Wartości współczynników α oraz β powinny być natomiast ustalone w taki sposób, aby algorytm miał okazję wstępnie przeszukać przestrzeń rozwiązań, przed przystąpieniem do wyznaczania wartości najbardziej obiecującego, znalezionej dotychczas minimum.

2.4.2. Metody inteligencji obliczeniowej

Do metod sztucznej inteligencji zalicza się sztuczne sieci neuronowe, algorytmy ewolucyjne oraz systemy rozmyte, które tworzą dziedzinę wiedzy zwaną inteligencją obliczeniową (ang. *Computational Intelligence*). Spośród wyżej wymienionych metod na szczególną uwagę zasługują algorytmy ewolucyjne, które z powodzeniem wykorzystywane są do wyznaczania przybliżonych rozwiązań problemów optymalizacyjnych. Ponadto sztuczne sieci neuronowe oferują niezwykle obiecującą metodę wielokryterialnej oceny harmonogramu uzyskaną dzięki procesowi uczenia przeprowadzonym na podstawie ocen wystawionych przez eksperta dla pewnej grupy harmonogramów wzorcowych.

2.4.2.1. Algorytmy ewolucyjne

Algorytmy ewolucyjne grupują pod wspólną nazwą wszystkie modele wykorzystujące mechanizmy ewolucji w rozwiązaniu problemów trudno algorytmizowalnych. Do algorytmów ewolucyjnych zalicza się [32, 33]: algorytmy genetyczne, programowanie ewolucyjne, strategie ewolucyjne, systemy klasyfikatorowe oraz programowanie genetyczne.

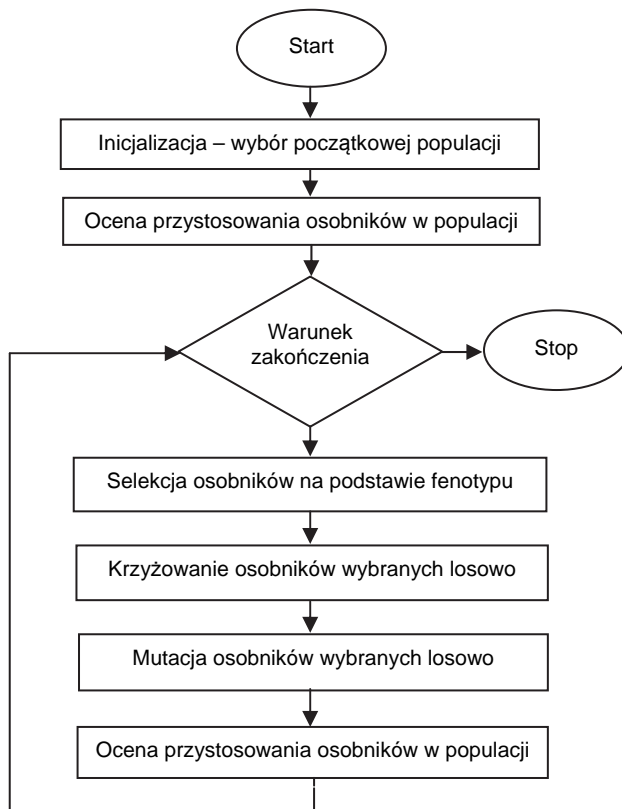
Ideę algorytmów genetycznych przedstawił John Holland w serii publikacji na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych. Algorytmy genetyczne korzystają z binarnej, zakodowanej reprezentacji problemu, co umożliwia łatwe definiowanie operatorów genetycznych, jednak równocześnie jest znacznym ograniczeniem w stosunku do specyficznych wymagań konkretnych zadań. Reprezentacja binarna pozwala jednakże na wprowadzenie podstaw teoretycznych działania algorytmów genetycznych na podstawie pojęcia schematu. Współcześnie klasyczne algorytmy genetyczne ustępują ich uogólnieniu w postaci algorytmów ewolucyjnych, które wyeliminowały najważniejsze ograniczenia koncepcji Hollanda. Zasadniczym rozszerzeniem algorytmów genetycznych jest zmiana alfabetu, który dobierany jest adekwatnie do wymagań problemu. Jak wykazano w [22], przejście z kodowania binarnego na kodowanie zmiennopozycyjne pozwala znacznie poprawić skuteczność i szybkość działania algorytmu genetycznego.

Algorytmy ewolucyjne wykorzystują mechanizmy ewolucji wykształcone przez naturę i w znacznej mierze korzystają z wiedzy z zakresu genetyki. W teorii algorytmów ewolucyjnych wykorzystywana jest następująca terminologia [29].

- Populacją nazywany jest zbiór osobników o określonej liczebności.
- Osobnikami lub organizmami nazywa się zbiór chromosomów (genotyp), reprezentujących parametry zadania. Najczęściej jako reprezentację danego osobnika wykorzystuje się jeden chromosom.
- Chromosom jest uporządkowanym ciągiem genów.
- Gen jest pojedynczym elementem genotypu lub w szczególnym przypadku chromosomu.
- Genotyp lub struktura jest to zbiór chromosomów reprezentujący danego osobnika.

- Fenotyp jest zdekodowanym na bazie funkcji przystosowania zestawem wartości odpowiadającym danemu genotypowi.
- Allel to wartość genu.
- Lokus określa miejsce, jakie zajmuje dany gen w chromosomie.

Kolejnym pojęciem wymagającym wyjaśnienia jest funkcja przystosowania, zwana także funkcją oceny lub funkcją dopasowania. Pełni ona niezwykle istotną rolę w procesie ewolucji, ponieważ pozwala na ocenę osobnika pod kątem jego przystosowania do warunków środowiska. Umożliwia to eliminację osobników słabo realizujących warunki zadania, czyli o gorszym fenotypie, i faworyzowanie osobników lepiej przystosowanych, o lepszym fenotypie.



Rys. 2.2. Algorytm ewolucyjny

Algorytm ewolucyjny jest algorytmem iteracyjnym. W każdej iteracji t generuje on populację osobników $P(t) = \{x'_1, \dots, x'_n\}$, gdzie przez n rozumie się rozmiar populacji. Każdy osobnik x'_n reprezentuje potencjalne rozwiązanie zadania. Algorytm realizowany jest w następujących krokach.

1. Inicjalizacja, polegająca na wygenerowaniu losowej populacji początkowej osobników reprezentujących rozwiązania dopuszczalne.
2. Ocena przystosowania osobników w populacji na podstawie funkcji przystosowania.

3. Kontrola warunku zakończenia działania algorytmu zdefiniowanego najczęściej w postaci określonej wartości, jaką osiągnąć powinien fenotyp najlepszego osobnika populacji, maksymalnej liczby iteracji lub maksymalnej liczby kolejnych iteracji, które nie poprawiły najlepszego uzyskanego dotychczas fenotypu. Jeżeli warunek zakończenia nie został spełniony, przejdź do kroku 5.
4. Zakończ.
5. Selekcja osobników na podstawie fenotypu z wykorzystaniem wskazanej metody selekcji.
6. Krzyżowanie osobników wybranych losowo. Krzyżowanie jest podstawowym operatorem ewolucyjnym mającym największy wpływ na tworzenie nowych osobników. W klasycznym algorytmie ewolucyjnym krzyżowanie osobników przeprowadzane jest z pewnym losowym prawdopodobieństwem p_k przyjmującym najczęściej wartości z przedziału $[0,5; 1]$. Dla każdego osobnika, który przeszedł pomyślnie etap selekcji, losowana jest liczba l_k z zakresu $[0; 1]$, która porównywana jest z p_k . W przypadku, gdy $l_k \leq p_k$, osobnik wybierany jest do operacji krzyżowania. Jeżeli liczba wybranych do krzyżowania osobników jest nieparzysta, losowo wybierany jest dodatkowy osobnik lub jeden z dotychczas wybranych nie podlega krzyżowaniu.
7. Mutacja osobników wybranych losowo. Mutacja pełni rolę drugoplanową w stosunku do krzyżowania. Wyraża się to znacznie mniejszym prawdopodobieństwem p_m wystąpienia mutacji w stosunku do wartości prawdopodobieństwa p_k . Najczęściej przyjmuje się p_m z zakresu $[0; 0,1]$. Mutacja genu przeprowadzana jest w przypadku, gdy $l_m \leq p_m$, gdzie l_m jest liczbą wybraną losowo z przedziału $[0; 1]$. Przy doborze prawdopodobieństwa p_m należy mieć na uwadze, iż losowanie liczby l_m odbywa się dla każdego genu niezależnie, co dla chromosomów o dużej liczbie genów i stosunkowo dużych wartości p_m może znacznie zwiększyć częstotliwość występowania mutacji w populacji.
8. Ocena przystosowania osobników w populacji na podstawie funkcji przystosowania.
9. Przejdź do kroku 3.

2.4.2.2. Sztuczne sieci neuronowe

Matematyczny model sztucznego neuronu po raz pierwszy opracowany został w 1943 roku przez McCullocha i Pittsa. Pierwowzorem sztucznego neuronu jest komórka nerwowa człowieka, jednak elementy używane w sztucznych sieciach neuronowych są w rzeczywistości znacznie uproszczone pod względem budowy i funkcjonowania w stosunku do biologicznego neuronu. Dokładna budowa neuronu biologicznego została przedstawiona w [34].

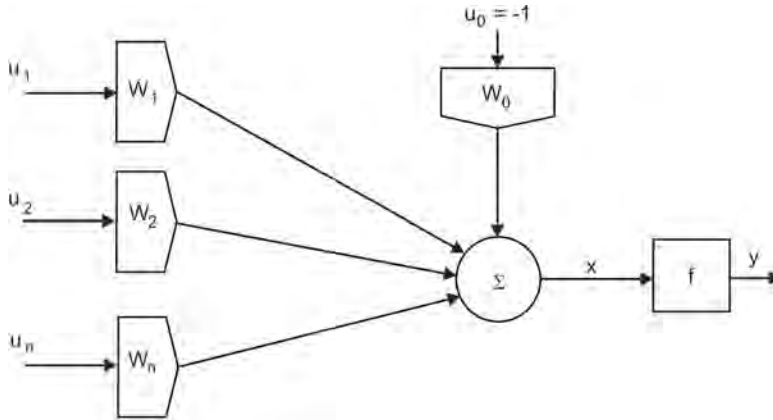
Pojedynczy sztuczny neuron może być rozpatrywany jako przetwornik sygnałów wejściowych w wyjściowe. Każdy neuron otrzymuje sygnały wyjściowe u_i , które mogą być przedstawione w postaci wektora sygnałów wejściowych $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$, gdzie przez n rozumie się liczbę wejść. Sygnały wejściowe mnożone są przez odpowiednie wartości wag, przedstawione w postaci wektora wag $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$. Tak przemnożone sygnały wejściowe poddawane są następnie sumowaniu w bloku sumowania w neuronie, dając w wyniku sygnał x nazywany potencjałem. Sygnał x poddawany jest następnie przetworzeniu w bloku aktywacji, który pozwala na określenie sygnału wyjściowego neuronu.

Operacja przeprowadzana w bloku sumowania neuronu opisana może być następująco [42]:

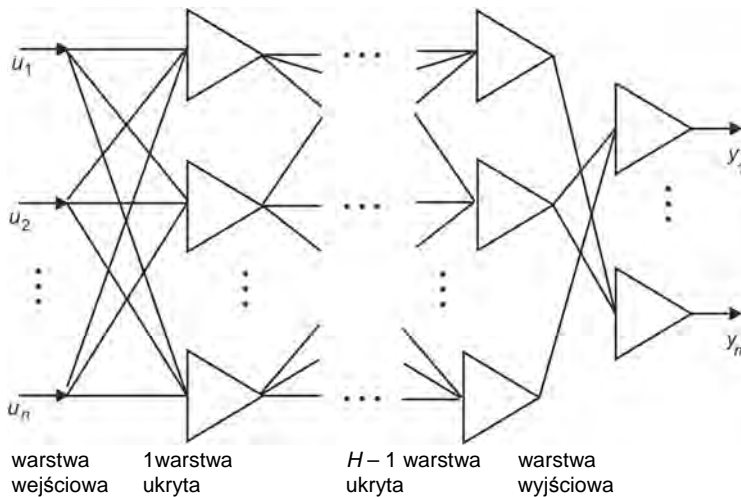
$$x = \sum_{i=0}^n w_i * u_i = \mathbf{W}^T * \mathbf{U}, \quad (2.4)$$

gdzie $(\cdot)^T$ jest operatorem transponowania macierzy.

Przy analizie wzoru (2.4) warto zwrócić uwagę na przyjęcie indeksu początkowego dla sumowania równego 0. W [26] wykazano, że dla prawidłowego działania sieci neuronowej niezbędne jest przyjęcie pewnego dodatkowego sygnału wejściowego $u_0 = -1$ oraz dodatkowej wagi w_0 . Iloczyn $u_0 \cdot w_0$ nazywany jest progiem (ang. *bias*) neuronu.



Rys. 2.3. Model sztucznego neuronu [29]



Rys. 2.4. Sieć jednokierunkowa (o H warstwach)

Wyjście neuronu y opisane może być następującą zależnością:

$$y = f(x) = \left(\sum_{i=0}^n w_i \cdot u_i \right), \quad (2.5)$$

gdzie $f(x)$ jest funkcją aktywacji. Warunki, jakie narzucone są na funkcję aktywacji, wymagają przede wszystkim, aby funkcja ta była łatwo różniczkowalna, co znacznie upraszcza dalsze obliczenia. Przyjmuje się także, że funkcja powinna przyjmować wartości z zakresu

[0; 1] lub [-1; 1]. Najczęściej wykorzystuje się liniowe funkcje aktywacji oraz tangens hiperboliczny lub funkcję sigmoidalną. W przypadku funkcji liniowej mówi się o neuronie liniowym i analogicznie w przypadku funkcji nieliniowych – neuronie nieliniowym. Przykłady funkcji aktywacji przedstawione zostały w pracach [26, 29, 42].

Sieci neuronowe budowane są z wielu sztucznych neuronów połączonych ze sobą w określone struktury. Wybór określonej struktury połączeń neuronów oraz ich liczby jest decydującym czynnikiem wpływającym bezpośrednio na możliwości, jakimi dysponuje sieć, oraz charakteryzującym grupy problemów, jakie można – opierając się na takich sieciach – rozwiązać. Generalnie rozróżnia się sieci neuronowe jednokierunkowe oraz rekurencyjne.

Działanie sieci jednokierunkowych opiera się na przepływie sygnałów od warstwy wejściowej poprzez warstwy ukryte do warstwy wyjściowej. Sieć neuronowa jednokierunkowa o zadanej liczbie neuronów oraz liczbie warstw inicjalizowana jest losowymi wartościami wektorów wag neuronów. Wyznaczenie pożądaných wartości wag pozwalających na rozwiązywanie danego problemu dokonuje się w procesie uczenia sieci neuronowej. Podczas procesu uczenia sieci neuronowej z nauczycielem na wejścia sieci podawane są ciągi uczące w postaci wektora sygnałów wejściowych \mathbf{U} , dla których znana jest pożądana odpowiedź dana jako wektor sygnałów wyjściowych \mathbf{D} . Porównanie wartości sygnałów wyjściowych wygenerowanych przez sieć \mathbf{Y} z pożądanymi wartościami wyjściowymi \mathbf{D} pozwala na wyznaczenie błędu, który jest podstawą do modyfikacji wag w kierunku zmniejszenia generowanego błędu. Iteracyjne modyfikowanie wag dla poprawnie przygotowanych ciągów uczących pozwala na wyznaczenie wartości wag, przy których sieć proponuje rozwiązania zgodne z oczekiwanymi. Sieć neuronowa, po przeprowadzonym procesie uczenia potrafi generalizować zdobytą wiedzę i rozwiązywać poprawnie problemy, z którymi styka się po raz pierwszy, jednakże należące do tej samej klasy zagadnień, na podstawie których była uczona. Przykładem algorytmów wykorzystywanych do nauki jednokierunkowych sieci neuronowych jest algorytm wstecznej propagacji błędu oraz algorytm Levenberga-Marquardta.

Sieci rekurencyjne korzystają z rekurencyjnych połączeń pomiędzy neuronami, to znaczy wykorzystując sprzężenia zwrotne, łączą wyjście neuronów z ich wejściami. Przy takim połączeniu sygnały będą oscylować pomiędzy warstwami do czasu ustalenia stanu równowagi. Wartości wektorów wag neuronów wyznaczone są jednorazowo przed przystąpieniem do przetwarzania na podstawie równań energii charakterystycznych dla zadanego problemu. Najbardziej znanym przykładem sieci rekurencyjnej jest sieć Hopfielda.

2.4.3. Implementacja algorytmów

Wszystkie zaprezentowane algorytmy zaimplementowane zostały w środowisku Matlab 5.3 z zainstalowanym rozszerzeniem w postaci Neural Networks Toolbox 3.0. Każdy z algorytmów jest uniwersalnym narzędziem pozwalającym na rozwiązanie dowolnego problemu typu general job-shop. Sformułowanie problemu harmonogramowania tego typu wymaga wprowadzenia niniejszej struktury problemu:

- każde zlecenie M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) definiuje ciąg technologiczny, czyli kolejność wykonywania operacji O_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$),
- ciąg technologiczny nie może zostać naruszony, co oznacza, że najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia danej operacji nie może poprzedzać terminu zakończenia operacji jej poprzedzającej,

- każda operacja O_{ij} definiuje grupę maszyn I_{ij} , na jednej z których może zostać zrealizowana oraz czas trwania T_{ij} ,
- zlecenia tworzą grupy zleceń zależnych R_k ($k = 1, 2, \dots, r$) o strukturze drzewa,
- struktura każdej grupy zleceń zależnych R_k nie może zostać naruszona, co oznacza, że najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia pierwszej operacji danego zlecenia nie może poprzedzać terminu zakończenia ostatniej operacji zlecenia będącego jego poprzednikiem,
- każde zlecenie musi zostać wykonane przed upływem zadanego terminu zakończenia P_i .

Każdy algorytm implementuje wielokryterialną ocenę harmonogramu na podstawie następujących kryteriów:

- MFT – średni czas przepływu zlecenia, liczony jako średnia arytmetyczna różnic między terminem zakończenia wykonywania zlecenia a terminem jego rozpoczęcia,
- MLT – przeciętne niedotrzymanie terminu realizacji zlecenia, liczone jako średnia arytmetyczna dodatnich różnic między rzeczywistym terminem zakończenia zlecenia a wymaganym terminem zakończenia zlecenia,
- LET – termin realizacji wszystkich zleceń, tożsamy z terminem zakończenia ostatniej operacji harmonogramu,
- NTL – liczba opóźnionych zleceń, równa liczbie zleceń, dla których przekroczony został wymagany termin zakończenia.

Powszechnie akceptowalną miarą efektywności prezentowanych rozwiązań testowych zadań harmonogramowania jest kryterium LET. Z tego względu waga tego kryterium w ocenie wielokryterialnej harmonogramów we wszystkich algorytmach ustalona została na 100%. Wyjątek stanowi system dyspozytorski, który jest algorytmem jednokrotnym, oraz algorytm hybrydowy, wyznaczający ocenę wielokryterialną z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej uczonej na podstawie ciągów uczących wartościowanych przez eksperta.

Przyjętą we wszystkich algorytmach wielokrotnych reprezentacją problemu harmonogramowania jest lista zleceń M_i ($i = 1, 2, \dots, n$) postaci:

$$M = \langle M_1, M_2, \dots, M_n \rangle.$$

Jednoznaczną reprezentacją każdej permutacji listy zleceń jest harmonogram. Przeszukanie wszystkich permutacji listy zleceń jest równoznaczne z wyznaczeniem rozwiązania optymalnego zgodnie z zadaniem kryterium. Harmonogram generowany jest poprzez wstawianie wszystkich operacji kolejnych zleceń zgodnie z ich pozycją na liście zleceń. Dlatego niezwykle istotną kwestią związaną z reprezentacją problemu jest przyjęta rozdzielczość zadania. Przez rozdzielczość rozumiany jest tu stosunek liczby zleceń do całkowitej liczby operacji. Dla rozdzielczości równej wartości 1, przestrzeń rozwiązań przeszukiwana jest w sposób zupełny, z tego względu, że permutowane są zlecenia, każde z nich reprezentujące jedną operację. Dla rozdzielczości bliskiej wartości 0 przeszukiwana przestrzeń rozwiązań jest znacznie zawężona, ponieważ nie są oceniane rozwiązania, dla których kolejność wstawiania operacji w ramach różnych zleceń jest dowolna. W przypadku gdy rozwiązywany problem jest zadaniem niezwykle złożonym lub równie ważnym jak precyzja wyznaczenia rozwiązania przybliżonego, należy stosować reprezentację problemu o niskiej rozdzielczości. Gdy priorytetem jest wyznaczenie najlepszego z możliwych rozwiązań, najlepiej zastosować rozdzielczość równą wartości 1 i adekwatnie do przyjętej reprezentacji zdefiniować grupy zleceń zależnych odzwierciedlających relacje następstw między operacjami.

Wszystkie algorytmy wielokrotne mogą generować przy wyznaczaniu rozwiązania sąsiedniego lub w wyniku zastosowania operatorów krzyżowania oraz mutacji, rozwiązania niedopuszczalne w postaci listy zleceń naruszającej struktury grup zleceń zależnych. W przypadku naruszenia ograniczeń technologicznych konieczne jest przeprowadzenie procedury naprawy. W dużym uproszczeniu analizuje ona grupy zleceń zależnych i w przypadku, gdy poprzednik danego zlecenia znajduje się na prawo w liście zleceń w stosunku do swojego następnika, to zlecenia te są zamieniane pozycjami. Operacja zamiany jest wykonywana wielokrotnie dla wszystkich zleceń w grupie do czasu, aż wystąpi konflikt przy analizowaniu zleceń grupy. Operacja naprawy jest przeprowadzana dla wszystkich grup zleceń niezależnie, co jak wykazały doświadczenia, wielokrotnie przyspiesza obliczenia.

2.4.3.1. System dyspozytorski

Koncepcja systemu dyspozytorskiego wymagała znacznych modyfikacji w celu uwzględnienia założeń dotyczących przyjętej struktury problemu. W klasycznym algorytmie tworzącym harmonogramy bez opóźnień zarówno pojęcie zlecenia, definiującego pewien ciąg technologiczny w postaci ciągu operacji, jak i pojęcia: grupy zleceń zależnych oraz grupy maszyn, nie zostały zdefiniowane. Zmodyfikowany algorytm wyznacza termin realizacji kolejnej operacji zgodnie z poniższym kryterium:

$$\delta^* = \min_j \min_{p \in \binom{j}{S_{so}^j}} \min_{l \in \{N_j\}} [\max(C_{lj}, s_{ljp})], \quad (2.6)$$

$$(j = 1, 2, \dots, m, p = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, \dots, h).$$

Przyjęte oznaczenia, zarówno w zależności (2.6), jak również w niżej opisanym algorytmie, mają następujące znaczenie:

- $\{G_{so}\}$ – zbiór niezrealizowanych zleceń, których wszystkie operacje zleceń je poprzedzających zostały umieszczone w harmonogramie,
- $\{G_{ip}\}$ – zbiór zrealizowanych zleceń, których wszystkie operacje zostały wstawione do harmonogramu,
- $\{G_{no}\}$ – zbiór niezrealizowanych zleceń, których nie wszystkie operacje zleceń je poprzedzających zostały umieszczone w harmonogramie,
- $\{S_{so}^j\}$ – zbiór operacji zleceń należących do zbioru $\{G_{so}\}$, oczekujących na ustalenie terminu wykonania na maszynie j -tej grupy, których operacja poprzedzająca została umieszczona w harmonogramie,
- $\{S_{ip}^j\}$ – zbiór operacji, których termin wykonania na t -tej maszynie został ustalony,
- $\{N_j\}$ – zbiór maszyn należących do j -tej grupy,
- C_{lj} – najpóźniejszy termin zakończenia operacji realizowanej na l -tej maszynie j -tej grupy maszyn,
- s_{ljp} – najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia p -tej operacji na l -tej maszynie j -tej grupy maszyn,
- m – liczba grup maszyn,
- n – liczebność zbioru $\{S_{so}^j\}$,
- h – liczebność zbioru $\{N_j\}$.

Zaimplementowany system dyspozytorski działa według poniższego algorytmu.

1. Wyznacz zlecenia należące do zbioru $\{G_{so}\}$.
2. Wyznacz operacje należące do zbiorów $\{S_{so}^j\}$ dla każdej grupy maszyn j .

3. Wyznacz dla każdej operacji ze zbiorów $\{S_{so}^j\}$ minimalny możliwy termin rozpoczęcia równy $\min_{l \in (N_j)} [\max(C_{lj}, s_{ljp})]$.
4. Wyznacz dla każdego zbioru $\{S_{so}^j\}$ minimalny termin rozpoczęcia operacji $\min_{p \in (S_{so}^j)} \min_{l \in (N_j)} [\max(C_{lj}, s_{ljp})]$.
5. Wyznacz minimalny termin rozpoczęcia operacji dla wszystkich grup maszyn $\delta^* = \min_j \min_{p \in (S_{so}^j)} \min_{l \in (N_j)} [\max(C_{lj}, s_{ljp})]$.
6. Wybierz operację, która może rozpocząć się w momencie δ^* , i przenieś tę operację ze zbioru $\{S_{so}^j\}$ do zbioru $\{S_{ip}^i\}$.
7. Zrealizowane zlecenia ze zbioru $\{G_{so}\}$ przenieś do zbioru $\{G_{ip}\}$.
8. Jeżeli zbiory $\{G_{no}\}$ oraz $\{G_{so}\}$ nie są puste, przejdź do kroku 1.
9. Zakończ.

2.4.3.2. Procedura wspinania na szczyt

Algorytm zaprojektowany zgodnie z koncepcją procedury wspinania na szczyt wymagał pewnych modyfikacji w stosunku do pierwowzoru. Zaimplementowany algorytm realizowany jest w następujących krokach.

1. Wygeneruj losowo rozwiązanie bieżące H .
2. Dokonaj naprawy rozwiązania bieżącego H , zgodnie ze strukturą każdej z grup zleceń zależnych.
3. Dokonaj oceny rozwiązania bieżącego H , zgodnie z przyjętym kryterium oceny harmonogramu.
4. Wygeneruj rozwiązanie sąsiednie H' w stosunku do rozwiązania bieżącego H .
5. Dokonaj naprawy rozwiązania sąsiedniego H' , zgodnie ze strukturą każdej z grup zleceń zależnych.
6. Dokonaj oceny rozwiązania sąsiedniego H' , zgodnie z przyjętym kryterium oceny harmonogramu.
7. Jeżeli rozwiązanie bieżące H gorzej minimalizuje założone kryterium oceny harmonogramu w stosunku do rozwiązania sąsiedniego H' , zastąp je rozwiązaniem sąsiednim H' .
8. Jeżeli nie został spełniony warunek zakończenia, przejdź do kroku 4.
9. Zakończ.

Znacząca modyfikacja procedury wspinania na szczyt w stosunku do wersji pierwotnej w rzeczywistości nie wprowadza istotnych zmian w koncepcji działania algorytmu. Powyżej zaproponowany algorytm pozwala na znaczną redukcję czasowej złożoności obliczeniowej algorytmu klasycznego, poprzez wykorzystanie metody wyboru pierwszego rozwiązania lepiej minimalizującego założone kryterium oceny w stosunku do rozwiązania bieżącego H . Dzięki temu generowanie zbioru wszystkich rozwiązań sąsiednich $\{H\}$, eliminowanie rozwiązań gorzej minimalizujących kryterium oceny oraz losowy wybór jednego z pozostałych rozwiązań jest równoznaczne z iteracyjnym generowaniem rozwiązania sąsiedniego dla danego rozwiązania bieżącego do czasu ustalenia modyfikacji prowadzącej do poprawy tego rozwiązania.

Warunek zakończenia algorytmu jest dwuargumentowy:

- numer bieżącej iteracji \leq maksymalna liczba iteracji oraz
- ocena bieżącego rozwiązania \leq oczekiwana ocena rozwiązania.

Dla potrzeb analizy porównawczej algorytmów maksymalna liczba iteracji została ustalona na 10 tys. iteracji przy warunku zakończenia równym wartości 0.

Algorytm implementuje dwie metody generowania rozwiązania sąsiedniego:

- dwusąsiedztwo – losowane są dwie pozycje listy zleceń, a następnie zlecenia zajmujące te pozycje zamieniane są miejscami,
- trójsąsiedztwo – losowane są trzy pozycje listy zleceń, a następnie zlecenia zajmujące te pozycje ulegają rotacji o jedną pozycję w prawo, to znaczy lista zleceń $\langle \dots, M_1, \dots, M_2, \dots, M_3, \dots \rangle$ przyjmuje postać $\langle \dots, M_3, \dots, M_1, \dots, M_2, \dots \rangle$.

Ocena rozwiązania bieżącego i sąsiedniego wykonywana jest na podstawie wartości kryteriów oceny harmonogramu. Harmonogram budowany jest poprzez wstawianie ciągów operacji kolejnych zleceń w najwcześniejszych możliwych terminach realizacji wyznaczonych dla każdej p -tej operacji, zgodnie z poniższym kryterium:

$$\delta^* = \min_{l \in \{N_j\}} L_{ljp} \quad (l = 1, 2, \dots, h), \quad (2.7)$$

gdzie: L_{ljp} – najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia p -tej operacji na l -tej maszynie j -tej grupy, wynikający z obciążenia l -tej maszyny oraz z ograniczeń technologicznych p -tej operacji,

$\{N_j\}$ – zbiór maszyn należących do j -tej grupy,

h – liczność zbioru $\{N_j\}$.

2.4.3.3. Symulowane wyżarzanie

Projekt algorytmu symulowanego wyżarzania zaczerpnięty został ze zmodyfikowanej procedury wspinania na szczyt. Jedyna zmiana dotyczy kroku 7 algorytmu, który przyjmuje następującą postać.

- 7a. Jeżeli rozwiązanie bieżące H gorzej minimalizuje założone kryterium oceny harmonogramu w stosunku do rozwiązania sąsiedniego H' , zastąp je rozwiązaniem sąsiednim H' i przejdź do kroku 8.
- 7b. Wyznacz temperaturę T_k oraz prawdopodobieństwo $p(k)$.
- 7c. Jeżeli $l < p(k)$, gdzie l oznacza losowo wygenerowaną liczbę z przedziału $[0; 1]$, zastąp rozwiązanie bieżące rozwiązaniem sąsiednim H' .

Warunek zakończenia wraz z wartościami współczynników, metody wyznaczania rozwiązań sąsiednich oraz metody budowania harmonogramów skonstruowane zostały identycznie jak w procedurze wspinania na szczyt. Wartości współczynników koniecznych do wyznaczania temperatury T_k przedstawiają się następująco: $\alpha = 0,95$, $\beta = 16$, $T_0 = 500$.

2.4.3.4. Algorytm ewolucyjny

Zaimplementowany algorytm ewolucyjny został zaprojektowany zgodnie z zarysem klasycznego algorytmu ewolucyjnego. Niemniej jednak konieczne okazało się uzupełnienie algorytmu o procedurę naprawy przeprowadzaną każdorazowo przed procedurą oceny populacji.

Reprezentacja populacji wykorzystana w algorytmie opiera się na macierzy dwuwymiarowej, której elementy e_{ij} wskazują na j -te w kolejności wykonania zlecenie i -tego osobnika. Każdy genotyp jest uporządkowaną listą zleceń zadanego problemu harmonogramowania.

Rezultatem inicjalizacji populacji są losowe permutacje listy zleceń. Zapewnia to statystycznie równomierną reprezentację przestrzeni rozwiązań w populacji początkowej.

Procedura oceny osobnika wykonywana jest na podstawie wartości kryteriów oceny harmonogramu analogicznie do procedury wykorzystanej w algorytmie symulowanego wyżarzania.

Selekcja osobników zaimplementowana w algorytmie korzysta z mechanizmu skalowania funkcji oceny, strategii elitarniej oraz selekcji metodą ruletki. Oceny po przeskalowaniu przyjmują wartości z przedziału $[0; 1]$, gdzie ocenę równą 1 otrzymuje najlepiej przystosowany osobnik populacji. Powyższe przekształcenie pozwala na zastosowanie metody ruletki, która działa tylko dla przypadku maksymalizacji. Skalowanie funkcji oceny jest przeprowadzane zgodnie z poniższym wzorem:

$$\text{skalowana} = \frac{\max\{\text{oceny}\} - \text{ocena}}{\max\{\text{oceny}\} - \min\{\text{oceny}\}}. \quad (2.8)$$

Skalowanie funkcji przystosowania jest wykonywane w celu eliminacji dwóch wad algorytmów ewolucyjnych [29]:

- dominacji superosobnika nad resztą populacji,
- zbytnej różnorodności osobników w końcowej fazie działania algorytmu, w przypadku gdy wszystkie osobniki mają zbliżony fenotyp.

Pierwszy problem spowodowany jest najczęściej korzystaniem z metody ruletki przy selekcji osobników. Natomiast zapobieganie nadmiernej różnorodności jest niezbędne w celu umożliwienia osobnikom o nieznacznie lepszym dopasowaniu zdobycia przewagi w populacji, gdy średnie dopasowanie populacji zbliża się do wartości optymalnej. Jest to więc niejako odwrócenie problemu pierwszego.

Metoda ruletki jest najbardziej popularną metodą selekcji wykorzystywaną w algorytmach ewolucyjnych. Istota metody opiera się na przydzieleniu każdemu osobnikowi wycinka koła ruletki o wielkości proporcjonalnej do fenotypu osobnika. Osobnik lepiej przystosowany do warunków zadania ma większe szanse na przejście przez sito selekcji. Metoda działa na podstawie następującego algorytmu [22]:

1. Wyznacz wartości fenotypu dla wszystkich osobników $P(t) = \{x'_1, \dots, x'_n\}$, gdzie przez n rozumie się rozmiar populacji, a t oznacza numer iteracji.
2. Wyznacz całkowite dopasowanie populacji

$$F^t = \sum_{i=1}^n f(x'_i).$$

3. Wyznacz prawdopodobieństwa wyboru każdego osobnika x'_i .

$$p'_i = \frac{f(x'_i)}{F^t}.$$

4. Wyznacz dystrybuanty dla każdego osobnika x'_i .

$$q_i^t = \sum_{j=1}^i p'_j.$$

5. Wykonaj n razy losowanie liczby r z przedziału $[0; 1]$. Każdorazowo, jeżeli $r \leq q'_1$, to osobnik q'_1 został wylosowany, w przeciwnym razie wylosowano i -tego osobnika, dla którego zachodzi $q'_{i-1} < r \leq q'_i$.

Każdy osobnik zostanie w przybliżeniu wylosowany [$e'_i = p'_i * n$] razy do populacji rodzicielskiej. Oczywiście osobnik o dobrym genotypie może zostać wylosowany wielokrotnie, zwiększając tym samym udział swojego materiału genetycznego w populacji następnej generacji. Wiąże się to z dużym niebezpieczeństwem wystąpienia superosobnika o bardzo niskim fenotypie w porównaniu z pozostałymi osobnikami, jednak o genotypie reprezentującym lokalne minimum. Taki osobnik może skutecznie uniemożliwić osiągnięcie minimum globalnego przez szybkie zdominowanie materiału genetycznego populacji.

Strategia elitarna używana jest w celu ochrony najlepszych znalezionych dotychczas osobników. Konieczność jej stosowania związana jest z faktem, iż często najlepsze osobniki nie przechodzą w niezmięnionej formie do następnej generacji populacji. Aby temu zapobiec, są one kopiowane bez zmian do następnej generacji.

Krzyżowanie osobników wykonywane jest z prawdopodobieństwem p_k z zastosowaniem zmodyfikowanego operatora GPMX (ang. *Generalized Partially Mapped Crossover*). Powstali w wyniku krzyżowania potomkowie wpisywani są na miejsce rodziców. Krzyżowaniu mogą podlegać wszystkie osobniki z wyłączeniem osobników kopiowanych według strategii elitarniej. Operator krzyżowania GPMX działa według następującego algorytmu.

1. Skopiuj rodziców w miejsce odpowiadających im potomków.
2. Wyznacz losowy podciąg rodzica nr 1.
3. Usuń z potomka nr 2 zlecenia znajdujące się w wylosowanym podciągu rodzica nr 1.
4. Wyznacz losową pozycję wstawienia podciągu rodzica nr 1 w potomku nr 2.
5. Wstaw podciąg rodzica nr 1 do potomka nr 2 w wylosowanej pozycji.
6. Wykonaj kroki 2–5 analogicznie dla drugiej pary rodzic-potomek.

Operator mutacji OBM (ang. *Order Based Mutation*) dokonuje mutacji zlecenia z prawdopodobieństwem równym p_m , zamieniając je pozycją z innym losowo wybranym zleceniem.

Warunek zakończenia algorytmu skonstruowany jest analogicznie do warunku procedury wspinania na szczyt. Dla potrzeb analizy porównawczej algorytmów przyjęto następujące wartości parametrów algorytmu:

- maksymalna liczba iteracji $T = 500$,
- liczba osobników populacji $N = 50$,
- oczekiwana wartość oceny $W = 0$,
- procent osobników kopiowanych według strategii elitarniej $p_s = 0,2$.

Krok 2. Rodzic nr 1

1	6	5	2	3	4
---	---	---	---	---	---

Krok 3 i 4. Potomek nr 2

4	1	6
---	---	---

Krok 2. Potomek nr 2

4	3	2	1	6	5
---	---	---	---	---	---

Krok 5. Potomek nr 2

4	1	5	2	3	6
---	---	---	---	---	---

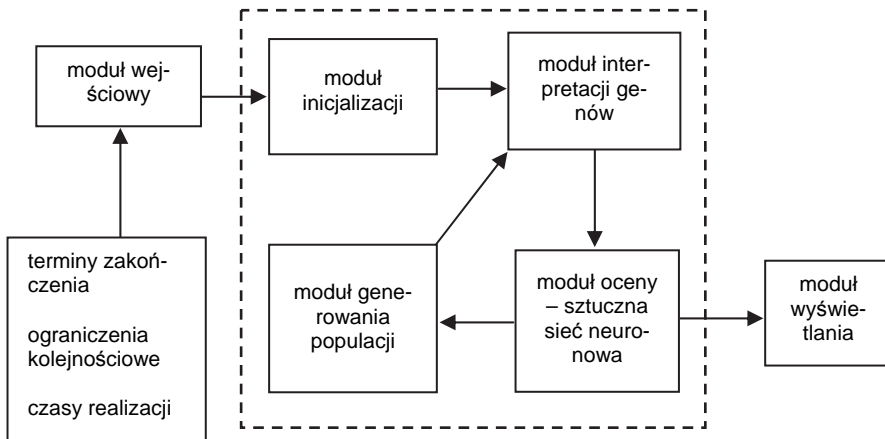
Rys. 2.5. Przykład zastosowania zmodyfikowanego operatora krzyżowania GPMX

2.4.3.5. Algorytm hybrydowy

Algorytm hybrydowy został oparty na koncepcji hybrydowego systemu harmonogramowania zaproponowanego w pracach autorstwa Daghiego i Sittisathanchi. Ogólny zarys systemu przedstawiony został na rysunku 2.2, jednakże w stosunku do pierwowzoru zostały poczynione znaczne modyfikacje.

System hybrydowy autorstwa Daghiego i Sittisathanchi korzysta z pełni możliwości, jakie oferują metody inteligencji obliczeniowej. Algorytm ewolucyjny stanowi fundament algorytmu hybrydowego. Siłą systemu hybrydowego tkwi jednak w wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych do oceny rozwiązań dostarczonych przez algorytm ewolucyjny.

Moduł inicjalizacji tworzy początkową populację dopuszczalnych rozwiązań, które będą podlegały procesowi przekształceń w kolejnych iteracjach algorytmu. Każdy chromosom składa się z liczby genów równej całkowitej liczbie operacji zadania harmonogramowania. Dopuszczalne rozwiązania inicjalne generowane są poprzez losowe budowanie sekwencji na podstawie tych operacji, dla których wszystkie operacje je poprzedzające dla danego zlecenia zostały już umieszczone w sekwencji.



Rys. 2.6. Architektura hybrydowego systemu harmonogramowania [3]

Moduł interpretacji buduje harmonogramy aktywne na podstawie danych dostarczonych przez moduł inicjalizacji w pierwszej iteracji algorytmu oraz moduł generowania populacji w kolejnych iteracjach. Moduł przetwarza kolejno operacje umieszczone w chromosomie wstawiając je do harmonogramu w najwcześniejszym możliwym terminie ich rozpoczęcia.

Moduł oceny opiniuje gotowe harmonogramy aktywne na podstawie następujących kryteriów jakości [27]:

- MFT – średni czas przepływu,
- MLT – przeciętne niedotrzymanie terminu realizacji,
- LET – termin realizacji,
- MTD – średni czas opóźnień,
- NTJ – liczba opóźnionych zleceń.

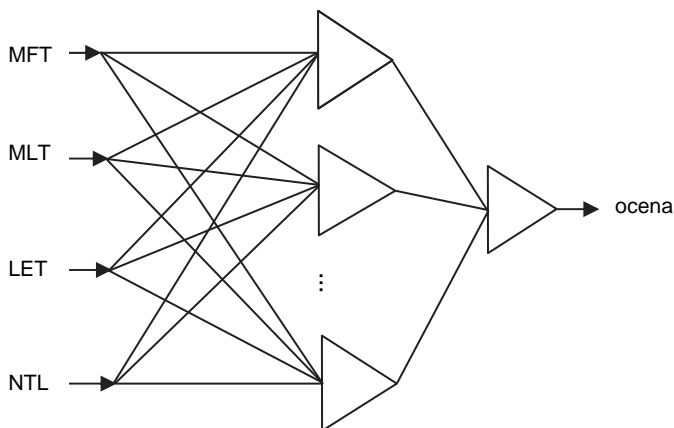
Ocena wielokryterialna jest w tym przypadku dokonywana przez wielowarstwową, jednokierunkową sztuczną sieć neuronową, uczoną algorytmem wstecznej propagacji błędów. Ciągi uczące, bazujące na ocenach ekspertów, podane sieci neuronowej w procesie

uczenia pozwalają na wyznaczenie optymalnych wartości wektorów wag. Nauczona sieć neuronowa dokonuje natychmiastowej oceny harmonogramu.

Zaproponowana sieć neuronowa składa się z czterech warstw. Warstwa wejściowa ma pięć wejść, dla każdego z kryteriów oceny harmonogramu. Pierwsza warstwa ukryta składa się z 20 neuronów, a druga – z 30 neuronów. Pojedynczy neuron warstwy wyjściowej zwraca ocenę harmonogramu z przedziału [1; 100].

Moduł generowania populacji działa na podstawie algorytmu ewolucyjnego. Chociaż pierwotnie autorzy systemu hybrydowego zaproponowali wykorzystanie selekcji turniejowej oraz operatorów krzyżowania OBX wraz ze specjalnie zmodyfikowanymi operatorami mutacji, to uzasadnione wydaje się wykorzystanie dowolnej reprezentacji zadań harmonogramowania wraz z zaprojektowanymi dla nich operatorami. Wybór konkretnego sposobu reprezentacji narzuca oczywiście pewne wymagania na moduł interpretacji genów. W szczególności moduł konstruujący harmonogram powinien być dostosowany do formatu danych otrzymywanych z modułów generowania populacji i inicjalizacji populacji.

Zaimplementowany algorytm korzysta z koncepcji algorytmu hybrydowego autorstwa Daghigho i Sittisathanchi, wprowadzając jednak znaczące modyfikacje. Architektura modułu ewolucyjnego wraz z wartościami parametrów algorytmu, operatorami krzyżowania oraz mutacji, zaczerpnięta została z algorytmu ewolucyjnego zaproponowanego w niniejszej pracy. Zasadnicza zmiana dotyczy procedury oceny harmonogramu, która dokonywana jest przez sztuczną sieć neuronową. Przed przystąpieniem do właściwego przetwarzania inicjalizowana jest dwuwarstwowa sieć neuronowa uczona z wykorzystaniem zmodyfikowanej wersji algorytmu wstecznej propagacji błędu Levenberga-Marquardta. Pierwsza warstwa sieci neuronowej składa się z 10 neuronów, druga z jednego neuronu. Obrazem wejściowym jest wektor czterowymiarowy przeskalowanych wartości kryteriów oceny harmonogramu, które przyjmują wartości z przedziału [0; 1]. Neurony pierwszej warstwy wykorzystują jako funkcję aktywacji tangens hiperboliczny, natomiast neuron drugiej warstwy – funkcję liniową. Ciągi uczące dla sieci neuronowej zostały przygotowane na podstawie metod heurystycznych. Ponadto oceny sieci neuronowej należą do przedziału [10; 20], gdzie ocenę maksymalną otrzymują najgorzej przystosowane osobniki.



Rys. 2.7. Struktura dwuwarstwowej sieci neuronowej oceniającej harmonogramy

2.4.4. Analiza porównawcza algorytmów heurystycznych i inteligentnych

Wysoka ocena jakościowa rozwiązań prezentowanych przez algorytmy zaproponowane w niniejszej publikacji została potwierdzona na testowym przykładzie harmonogramowania MT 10×10 sformułowanym przez Fishera i Thompsona. Problem MT 10×10 jest przykładem zadania typu 10/10/G/LET, czyli problemu *general job-shop* dla 10 zleceń oraz 10 maszyn, gdzie kryterium oceny harmonogramu jest termin realizacji wszystkich zleceń.

Wartość kryterium LET oceny harmonogramu dla problemu MT 10×10 jest miarą skuteczności algorytmów, która jest podstawą przy ocenie efektywności proponowanych metod rozwiązywania problemów szeregowania zadań. Dotychczasowe osiągnięcia na tym polu zaprezentowane zostały w tabeli 2.2. Po raz pierwszy wartość optymalna, 930 jednostek czasu, uzyskana została przez Adamsa, Balasa oraz Zawacka w 1988 roku.

System dyspozytorski należy do klasy algorytmów deterministycznych, które dla określonych danych wejściowych prezentują zawsze jednakowe rozwiązanie. Ponadto algorytm ten buduje harmonogramy bez opóźnień na podstawie listy operacji możliwych do wstawienia do harmonogramu bez naruszenia ograniczeń technologicznych i z tego względu wynik jego działania jest także w pełni niezależny od przyjętej rozdzielczości problemu.

Tabela 2.1

Problem harmonogramowania MT 10×10 [3]

Zlecenie	Czas T_{ij}	Operacje O_j									
		O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}
M_j	Grupa maszyn I_j										
M_1	T_{1j}	29	78	9	36	49	11	62	56	44	21
	I_{1j}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M_2	T_{2j}	43	90	75	11	69	28	46	46	72	30
	I_{2j}	1	3	5	10	4	2	7	6	8	9
M_3	T_{3j}	91	85	39	74	90	10	12	89	45	33
	I_{3j}	2	1	4	3	9	6	8	7	10	5
M_4	T_{4j}	81	95	71	99	9	52	85	98	22	43
	I_{4j}	2	3	1	5	7	9	8	4	10	6
M_5	T_{5j}	14	6	22	61	26	69	21	49	72	53
	I_{5j}	3	1	2	6	4	5	9	8	10	7
M_6	T_{6j}	84	2	52	95	48	72	47	65	6	25
	I_{6j}	3	2	6	4	9	10	1	7	5	8
M_7	T_{7j}	46	37	61	13	32	21	32	89	30	55
	I_{7j}	2	1	4	3	7	6	10	9	8	5
M_8	T_{8j}	31	86	46	74	32	88	19	48	36	79
	I_{8j}	3	1	2	6	5	7	9	10	8	4
M_9	T_{9j}	76	69	76	51	85	11	40	89	26	74
	I_{9j}	1	2	4	6	3	10	7	8	5	9
M_{10}	T_{10j}	85	13	61	7	64	76	47	52	90	45
	I_{10j}	2	1	3	7	9	10	6	4	5	8

Rezultaty prezentowane przez algorytmy wielokrotne zgodnie z oczekiwaniami okazały się silnie zależne od rozdzielczości sformułowanego problemu. Reprezentacja problemu szeregowania zadań o rozdzielczości równej wartości 1 pozwala na uzyskanie rozwiązań charakteryzujących się statystycznie niższą średnią wartością kryterium LET, niż w przypadku reprezentacji zadania o rozdzielczości równej wartości 0,1.

Tabela 2.2Wyniki rozwiązania testowego MT 10×10 [3]

Rodzaj algorytmu	Autorzy, rok	Wynik
Algorytm SB (Shifting Bottleneck)	Adams, Balas, Zawack, 1988	930
Metoda podziałów i ograniczeń	Carlter, Pinson, 1989	930
Algorytm ewolucyjny	Nakano, Yamada, 1991	965
Algorytm ewolucyjny	Davidor, Yamada, Nakano, 1993	963
Algorytm ewolucyjny	Fang, Ross, Corne, 1993	949
Algorytm ewolucyjny	Bruns, 1995	976
Symulowane wyżarzanie	Bruns, 1995	1022
Algorytm ewolucyjny	Park, Park, 1995	936
Algorytm hybrydowy	Mattfeld, 1996	930

Wartości prawdopodobieństwa mutacji p_m i prawdopodobieństwa krzyżowania p_k , wykorzystywane w algorytmach: ewolucyjnym oraz hybrydowym wyznaczone zostały empirycznie. Wartości średniego przystosowania najlepszych osobników populacji dla różnych wartości prawdopodobieństw zaprezentowane zostały w tabeli 2.3.

Tabela 2.3

Wartości średniego przystosowania najlepszych osobników populacji dla różnych wartości prawdopodobieństwa krzyżowania i mutacji

Algorytm ewolucyjny	Prawdopodobieństwo p_k		
Prawdopodobieństwo p_m	0,4	0,5	0,6
0,03	985	974	1013
0,05	1018	999	981
Algorytm hybrydowy	Prawdopodobieństwo p_k		
Prawdopodobieństwo p_m	0,4	0,5	0,6
0,03	1006	986	986
0,05	992	1001	979

Najniższe oraz średnie wartości kryterium LET oceny harmonogramów skonstruowanych przez zaimplementowane w niniejszym opracowaniu algorytmy zaprezentowane zostały w tabeli 2.4.

System dyspozytorski wyznaczył dalece niesatysfakcjonujące rozwiązanie problemu testowego. Jest to związane bezpośrednio z metodologią tworzenia harmonogramu bez opóźnień, który nie jest rozwiązaniem optymalnym w tym przypadku. Natomiast algorytmy

wielokrotne zbudowały harmonogramy charakteryzujące się znacznie niższą wartością średnią kryterium LET. Ponadto widoczny jest podział na dwie grupy algorytmów:

- prezentujących wyniki oscylujące w granicach 1010 jednostek czasu, do której zaliczają się proste algorytmy wielokrotne: procedura wspinania na szczyt oraz symulowane wyżarzanie z generatorem dwusąsiedztwa,
- prezentujących wyniki oscylujące w granicach 980 jednostek czasu, do której zaliczają się złożone algorytmy ewolucyjne oraz, niespodziewanie, symulowane wyżarzanie z generatorem trójsąsiedztwa.

Tabela 2.4

Wartości najlepszych i średnich rezultatów oraz odchyłeń standardowych rozwiązań zaprezentowanych przez zaimplementowane algorytmy

Algorytm	Najlepszy rezultat	Średni rezultat	Odchylenie standardowe
System dyspozytorski	1262	–	–
procedura wspinania na szczyt dwu-sąsiedztwo	983	1009	20,8
Procedura wspinania na szczyt trój-sąsiedztwo	973	1016	30,3
Symulowane wyżarzanie dwu-sąsiedztwo	981	1014	30,1
Symulowane wyżarzanie trój-sąsiedztwo	955	985	21,4
Algorytm ewolucyjny ($p_k = 0,5$, $p_m = 0,03$)	970	974	7,5
Algorytm hybrydowy ($p_k = 0,6$, $p_m = 0,05$)	956	979	23,0

Porównanie osiągniętych wyników z rezultatami zawartymi w tabeli 2.2 pozwala na wystawienie wysokiej oceny jakości generowanych przez zaimplementowane algorytmy rozwiązań. Na szczególną uwagę zasługują rezultaty algorytmu hybrydowego oraz algorytmu symulowanego wyżarzania ze względu na niskie wartości kryterium LET najlepszego wyznaczonego rozwiązania oraz algorytm ewolucyjny z racji niskiej wartości odchylenia standardowego prezentowanych wyników.

Niezaprzeczalną zaletą algorytmów wielokrotnych pozostaje z pewnością możliwość dowolnego definiowania wykorzystywanego modelu oceny harmonogramów. Mechanizm oceny bazujący na wiedzy eksperta umożliwia budowanie harmonogramów preferujących dowolne kryterium oceny, takie jak terminowość wykonania zleceń lub średni czas przepływu zlecenia.

2.4.5. Podsumowanie

Sformułowanie ogólnego zadania planowania kalendarzowego w terminach programowania dyskretnego oraz różne jego modyfikacje nie oznaczają, że zagadnienia te są rozwiązywane efektywnie, tj. w sposób ścisły dla dużej liczby zmiennych. W rzeczywistych warunkach produkcyjnych metody dokładne nie muszą być jednak stosowane, wystarczające są metody przybliżone.

Podczas dynamicznie zmieniającej się sytuacji przemysłowej najważniejsza jest szybkość otrzymania wyników, nowego harmonogramu lub nowych decyzji korygujących stany poprzednie, wynikające z powstania nowych warunków decyzyjnych. Dlatego równoległe z poszukiwaniami rozwiązań ściśle optymalnych prowadzi się badania metod heurystycznych i symulacyjnych dla otrzymania rozwiązań przybliżonych, a w przypadku niemożliwości otrzymania liczbowej oceny przybliżenia – przyjmuje się wyniki dopuszczalne w danej rzeczywistości produkcyjnej. Należy dodać, że dokładne rozwiązanie jednego zadania kalendarzowego bez rozwiązania innych zadań nie zwiększa efektywności sterowania całego procesu. W rezultacie więc efektywność sterowania nie zwiększa się, jeśli nie będzie ono rozpatrywane w kompleksie wszystkich funkcji sterowania.

Podrozdział 2.4 niniejszej pracy zawiera propozycję algorytmów: ewolucyjnego oraz hybrydowego, zaimplementowanych w środowisku Matlab 5.3, prezentujących rozwiązania zbliżone do rozwiązań optymalnych dla dowolnego problemu harmonogramowania produkcji typu general job-shop. Zawiera on również analizę porównawczą rezultatów prezentowanych przez powyższe algorytmy oraz algorytmy: symulowanego wyżarzania, przeszukiwania sąsiedztwa i system dyspozytorski dla standardowego problemu szeregowania zadań MT 10×10 .

Zaimplementowane w ramach niniejszego opracowania algorytmy szeregowania zadań potencjalnie pozwalają na wyznaczenie satysfakcjonującego rozwiązania przybliżonego dowolnego problemu typu general job-shop w akceptowalnym czasie. Dalszej analizy wymagają z pewnością metody generowania sąsiedztwa oraz operatory krzyżowania i mutacji, których jakość jest czynnikiem decydującym o efektywności i skuteczności zaproponowanych algorytmów.

Analiza porównawcza wyników wyznaczonych przez algorytmy inteligentne oraz heurystyczne dowiodła wyższości algorytmów ewolucyjnych i hybrydowych nad algorytmami przeszukiwania sąsiedztwa. Na uwagę zasługuje także dobry rezultat uzyskany przez algorytm symulowanego wyżarzania, korzystający z generatora trójsąsiedztwa. Niestety, nie zmienia to faktu, iż żaden algorytm spośród przedstawionych w niniejszym opracowaniu nie wyznaczył rozwiązania optymalnego problemu testowego MT 10×10 .

Technologie informacyjne w elastycznych systemach produkcji

Niniejszy rozdział poświęcony jest ogólnej charakterystyce stosowanych technologii informacyjnych w elastycznych systemach produkcyjnych. Zawarto w nim podstawowe założenia i wymogi technologii informatycznych w rozważanej klasie systemów produkcji.

Omówiono techniczne, ekonomiczne i organizacyjne aspekty projektowania systemów informatycznych elastycznych systemów produkcyjnych.

Złożoność elastycznego systemu produkcji wymaga łączenia wiedzy ekonomiczno-organizacyjnej z techniczno-informatyczną. Baza danych systemu produkcyjnego i skojarzone z nią metody zarządzania oraz sposób jej implementacji w praktyce stanowi integralną część projektową ESP.

Proces produkcyjny jest tym bardziej efektywny, im bardziej efektywne są jego elementy i narzędzia składowe. Tymi elementami są środki automatyzacji, algorytmy, formy organizacyjne, strategia finansowa i inne komponenty z człowiekiem i jego wiedzą na czele.

Właściwe zaprojektowanie systemu informacyjnego dla elastycznego systemu produkcji (wybranego fragmentu) wpływa na poprawę działalności przedsiębiorstwa, podnosząc jego poziom efektywności.

3.1. Znaczenie technologii informacyjnej w elastycznym systemie produkcji

Dyskusja dotycząca roli technologii informacyjnej (*information technology*) w elastycznych systemach produkcji jest istotna z uwagi na zmiany paradygmatu ich modelowania i funkcjonowania. Geneza ESP związana jest bezpośrednio z wytwórczym podsystemem systemu produkcyjnego, głównie w przemyśle maszynowym i elektromaszynowym. Wynikało to w znacznym stopniu z poziomu rozwoju środków techniczno-organizacyjnych, utrudniających osiągnięcie elastyczności poza systemem wytwórczym i w bardziej uniwersalny sposób (elastyczność informacyjna) nie tylko za pomocą określonych maszyn i urządzeń (np. pewne typy obrabiarek). Z tego powodu elastyczność produkcji, czyli adaptacyjną zmienność asortymentu wyrobów, utożsamiano często w literaturze ze zautomatyzowaną elastycznością produkcji. Tak rozumiana elastyczność dotyczyła głównie jej wymiaru technologicznego w podsystemie wytwarzania.

3.1.1. System informacyjny

System informacyjny jest celowo zaprojektowanym i eksploatowanym systemem umożliwiającym człowiekowi gromadzenie, przechowywanie, przetwarzanie i przekazywanie informacji. Pod pojęciem systemu informatycznego rozumiemy system in-

formacyjny, wykorzystujący środki i metody informatyczne, a zwłaszcza sprzęt i oprogramowanie komputerowe.

Systemy informacyjne definiowane są w sposób sformalizowany na gruncie matematycznym od czasów B. Shanona.

Porównując z literatury różnorodne określenia systemu informacyjnego, pod kątem zastosowań w praktyce gospodarczej, przyjęto w niniejszej pracy definicję Z. Pawlaka, modyfikując ją zgodnie z pracą [1] dla potrzeb specyfiki komputerowo wspomaganých systemów informacyjnych.

Przez system informacyjny rozumiemy zatem czwórkę:

$$S = \langle P, I, O, F \rangle,$$

gdzie: P – zdefiniowany zbiór parametrów, w szczególności są to informacje wejściowe systemu,
 I – skończony zbiór informacji znajdujących się w systemie, stanowiący odwzorowanie zdefiniowanego zbioru obiektów świata rzeczywistego X oraz zbioru ich atrybutów A

$$X \cdot A \rightarrow I$$

O – ograniczony zbiór odpowiedzi, w szczególności są to efektywne informacje wyjściowe systemu,

F – zdefiniowany zbiór funkcji systemu

$$F: P \cdot I \rightarrow O,$$

Przyjmuje się, że systemy typu MIS (ang. *Management Information System*), DDS (ang. *Decision Support System*), EIS (ang. *Executive Information System*), jako **systemy informowania** są szczególnym przypadkiem systemów informacyjnych.

Na szczególną uwagę zasługuje również definicja systemu informacyjnego sformułowana przez J. Kisielnickiego oraz M. Srokę¹⁾ „...**system informacyjny (SI) możemy określić jako wielopoziomową strukturę, która pozwala użytkownikowi tego systemu na transformowanie określonych informacji wejścia na požądane informacje wyjścia za pomocą odpowiednich procedur i modeli**”.

W wyniku uzyskania tych informacji podejmowane są określone decyzje. Dlatego więc konkretny system informacyjny można rozpatrywać jako:

- wielopoziomową strukturę,
- element łańcucha decyzyjnego funkcjonujący w systemie zarządzania. Z formalnego punktu widzenia system informacyjny (SI) dowolnej organizacji można przedstawić jako następujący zbiór elementów:

$$SI = \{P, I, T, O, M, R\},$$

gdzie: SI – system informacyjny danej organizacji,

P – zbiór podmiotów, które są użytkownikami systemu,

I – zbiór informacji o sferze realnej, czyli o jej stanie i zachodzących w niej zmianach, a więc tzw. zasoby informacyjne,

T – zbiór narzędzi technicznych stosowanych w procesie pobierania, przesyłania, przetwarzania, przechowywania i wydawania informacji²⁾,

¹⁾ Kisielnicki J., Sroka H.: Systemy informacyjne biznesu. Informatyka dla zarządzania. Warszawa: Agencja Wydawnicza „Placet” 1999.

²⁾ T – zbiór narzędzi technicznych stosowanych w ESP.

- O* – zbiór rozwiązań systemowych stosowanych w danej organizacji, a więc stosowana formuła zarządzania (scentralizowana, rynkowa),
- M* – zbiór metainformacji, czyli opis systemu informacyjnego i jego zasobów informacyjnych,
- R* – relacje między poszczególnymi zbiorami.

3.2. Wymogi dla technologii informacyjnych ESP

3.2.1. Integracja informacyjna ESP

Warunki, jakie muszą spełniać technologie informatyczne ESP, wynikają z metodologii projektowania ESP, w której można wyróżnić następujące grupy zadań, które zostały sformułowane w rozdziale 4. niniejszej pracy:

- określenie zbioru funkcji,
- metody integrowania,
- metody osiągnięcia elastyczności,
- konstrukcja bazy danych,
- opracowanie algorytmów,
- konfiguracja sprzętu,
- przygotowanie personelu,
- ocena efektywności ekonomicznej.

Wyżej podana kolejność grup problemowych zbliżona jest do ich porządku chronologicznego w trakcie projektowania systemu, jednakże faktyczna kolejność poszczególnych czynności może być ustalona dopiero na poziomie operacyjnym wykonywania projektu.

Ponadto, niezależnie od tego, że każda z wymienionych grup zawiera cały szereg procedur projektowych, niektóre z zadań występują podczas całego procesu projektowania – dotyczy to zwłaszcza zarządzania finansami, związanego z oceną efektywności ekonomicznej przedsięwzięcia i komputerowego wspomagania procesu projektowania.

Zgodnie z pracą [11], w ESP rozróżnia się trzy typy procesów:

- 1) procesy podstawowe,
- 2) procesy pomocnicze,
- 3) procesy info-sterujące.

Wyróżnione procesy mają charakter rekursywny, co oznacza, że dla dowolnego procesu i -tego szczebla zarządzania istnieją jego trzy wymienione podprocesy składowe na szczeblu $i-1$. Przegląd metodologii projektowania systemów produkcyjnych w pracach [1: 45], [2: 55], wskazuje jednak na duże znaczenie analizy strukturalnej systemu na tym etapie jego projektowania. Oznacza to, że specyfikowane funkcje rozpatrywane są głównie w połączeniu z podsystemami, w których występują, co ma niezwykle istotne znaczenie dla sposobu konstruowania systemu informacyjnego ESP.

Przez analogię do trzech typów procesów występujących w systemie produkcyjnym, można wyróżnić w nim trzy główne podsystemy:

- 1) podsystem podstawowy,
- 2) podsystem pomocniczy,
- 3) podsystem info-sterujący.

Idea integracji stanowi podstawowy punkt wyjścia dla dochodzenia do wysokiego stadium organizacji systemu produkcyjnego, jakim jest elastyczny system produkcyjny

zintegrowany komputerowo – FSM/CIM. A zatem jego wymiar informacyjny i jego pochodne informatyczne muszą być uwzględniane już podczas specyfikowania funkcji dla poszczególnych podsystemów systemu podstawowego:

- podsystem wytwarzania obejmujący operacje technologiczne,
- podsystem transportu obejmujący transport urządzeniami transportowymi między stanowiskami,
- podsystem manipulacji obejmujący urządzenia manipulacyjne przemieszczające obiekty głównie w obrębie stanowiska,
- podsystem magazynowania obejmujący przechowywanie zapasów centralnie i lokalnie.

Podsystem info-sterujący podsystemu podstawowego należy określić w połączeniu z całością ESP, co jest warunkiem uzyskania odpowiedniego poziomu elastyczności informacyjnej. Określenie zbioru funkcji podsystemu pomocniczego oraz jego specyfiki informacyjnej jest w dużej mierze pochodną zbioru funkcji podsystemu podstawowego.

Integracja systemu produkcyjnego może odbywać się w różnych aspektach (np. integracja lokalizacyjno-transportowa związana z typologią i fizycznym rozmieszczeniem stanowisk pracy). Podstawowe znaczenie przypisuje się integracji informacyjnej, tzn. takiej, dla której czynnikiem integrującym jest informacja (komputerowe wspomaganie). Scalanie współdziałających ze sobą elementów systemu produkcyjnego może odbywać się w dwojaki sposób:

- 1) przez ich łączenie na drodze zastępowania mniejszą liczbą modułów, co redukuje liczbę elementów systemu, lub
- 2) przez ściślejsze powiązania na drodze zwiększenia liczby relacji zachodzących między nimi.

Oba procesy mogą zachodzić równolegle z różnym nasileniem, przy czym zawsze zostaje zachowana lub polepszona funkcjonalność systemu. Dla integracji informacyjnej ESP kluczową rolę odgrywa drugi z wymienionych mechanizmów, a jego implementacja wynika ze specyfiki konfiguracji hardware'owo-software'owej.

3.2.2. Elastyczność informacyjna ESP

Istnieje wiele rodzajów elastyczności, przy czym każdy z nich da się rozpatrywać w dwóch wymiarach: czasowym i ekonomicznym.

Dla wyspecyfikowania problematyki systemu informacyjnego ESP niezbędne jest wprowadzenie pojęcia elastyczności informacyjnej. Przez **elastyczność informacyjną** ESP rozumiemy funkcję opisującą zależność rentowności od czasu związanego ze zmianą parametrów systemu (np. cech wyrobów, materiałów i in.).

Rentowność – relacja między wynikiem W i nakładami N ³⁾ może być wyrażona jako:

- rentowność względna R – stosunek wyniku do poniesionych nakładów:

$$R = \frac{W}{N}, \quad (3.1)$$

gdzie: R – rentowność względna,

³⁾ Czechowski L.: Wielowymiarowa ocena efektywności ekonomicznej przedsiębiorstwa przemysłowego. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 1997.

W – wynik ekonomiczny,

N – nakłady;

— rentowność bezwzględna R_B – nadwyżka wyniku nad nakładami:

$$R_B = W - N, \quad (3.2)$$

gdzie: R_B – rentowność bezwzględna,

— stopa rentowności S_R – stopa nadwyżki wyniku:

$$S_R = \frac{W - N}{N}, \quad (3.3)$$

gdzie: S_R – stopa rentowności.

Na potrzeby oceny efektywności ekonomicznej rozpatrywanej w niniejszej pracy przyjmuje się pojęcie rentowności względnej.

Elastyczność informacyjna ESP jest cechą jego systemu informacyjnego, umożliwiającą adaptację do zmiennych warunków otoczenia w określonym czasie i przy określonych nakładach. Oznacza to, że elastyczność informacyjna umożliwia zmienność parametrów zawartych w systemie i jego funkcji. Modyfikacja tych elementów winna prowadzić do poprawy rentowności ESP w założonym czasie.

System informacyjny ESP powinien spełniać następujące warunki:

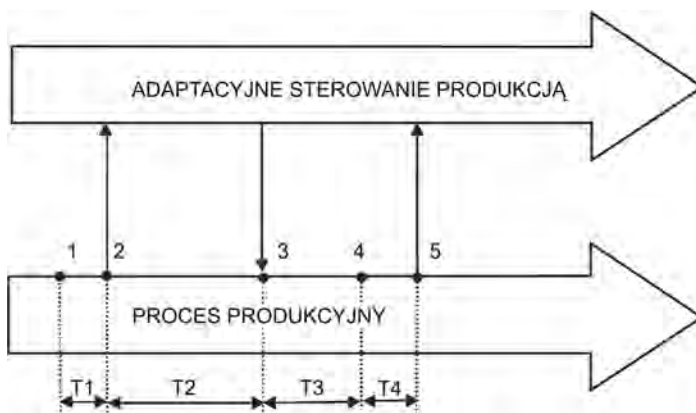
- parametry wejściowe systemu winny być łatwo modyfikowalne, bez konieczności gruntownych zmian funkcji i struktury informacyjnej systemu,
- zmiany wartości atrybutów i obiektów w świecie rzeczywistym winny się łatwo odwzorowywać na informacje zawarte w systemie,
- zmodyfikowane odpowiedniki systemu informacyjnego powinny zachować swe cechy ergonomiczne i podnosić jego efektywność użytkową,
- zbiór funkcji systemu informacyjnego powinien się rozbudowywać w sposób modularny, a konieczność zmian w jednej funkcji pociągać za sobą ograniczoną i kontrolowaną konieczność zmian w pozostałych funkcjach.

Z punktu widzenia składowej czasowej, elastyczność informacyjna może być charakteryzowana za pomocą reaktywności informacyjnej i sterowności informacyjnej ESP, definiowanych następująco (rys. 3.1):

- **reaktywność informacyjna** jest to odchylenie pomiędzy informacją wejściową o zmianie w otoczeniu a wyjściową informacją sterującą, związaną z tą zmianą. Możemy ją wyrazić jako odwrotność czasu, który upływa pomiędzy informacją wejściową o zmianie w otoczeniu a wyjściową informacją sterującą;
- **sterowność informacyjna** jest mierzona odwrotnością czasu, jaki upływa pomiędzy powstaniem informacji o zmianie w otoczeniu, a zadziałaniem informacji sterującej na otoczenie (proces produkcyjny).

Parametry te rzutują na adaptacyjność systemu sterowania procesem produkcyjnym. Podwyższenie reaktywności informacyjnej i sterowności informacyjnej osiąga się, skracając czasy opóźnień z nimi związane.

Podstawowym środkiem wiodącym do tego celu jest unowocześnienie systemu przetwarzania informacji poprzez zastosowanie sprzętu komputerowego, wykorzystującego odpowiednie algorytmy sterowania.



Rys. 3.1. Miary elastyczności informacyjnej: 1 – powstanie informacji w procesie produkcyjnym (otoczeniu), 2 – wejście informacji o zmianie, 3 – wejście informacji sterującej, 4 – zadziałanie informacji sterującej, 5 – wejście informacji o zadziałaniu informacji sterującej; T1, T4 – czasy opóźnienia związane ze zbieraniem i przetwarzaniem informacji, T2 – czas, który upływa między informacją wejściową o zmianie w otoczeniu a wyjściową informacją sterującą, T3 – czas opóźnienia pomiędzy wejściem a zadziałaniem informacji sterującej. Reaktywność informacyjna R_i wyraża się następująco: $R_i = 1/T_2$; Sterowność informacyjną S_i przedstawia zależność: $S_i = 1/(T_1 + T_2 + T_3 + T_4)$

3.2.3. Szczegółowe wymagania dla technologii informacyjnych ESP

Specyfikowane wymagania można pogrupować w czterech dużych obszarach problemowych:

- 1) **problemy użytkowników** (bezpośredni użytkownicy systemu, przedsiębiorstwo),
- 2) **problemy specjalistów** (projektantów, techników, informatyków i innych),
- 3) **problemy techniczne** (sprzęt, oprogramowanie),
- 4) **problemy organizacyjne** (zarządzanie, finanse).

W wymienionych obszarach problemowych można wyspecyfikować następujące szczegółowe wymagania dla technologii informatycznych w ESP:

- możliwość zapamiętywania i przetwarzania wielkiej i ciągle rosnącej ilości danych ze świata rzeczywistego;
- kontrolowana strukturyzacja danych i przekształcenie ich w użyteczne informacje, a nawet w wiedzę (systemy sztucznej inteligencji);
- integracyjna rola systemu informacyjnego w stosunku do ESP i całości przedsiębiorstwa;
- wieloużytkowe i wieloprotocowe przetwarzanie danych z odpowiednią szybkością;
- zdalny dostęp i przetwarzanie danych z odpowiednią szybkością;
- asynchroniczny zapis i odczyt danych przy zachowaniu ich spójności;
- ergonomiczność i graficzna wizualizacja danych;
- zapewnienie użytkownikowi możliwości spontanicznej i kreatywnej pracy;
- samoopisywanie i samodokumentowanie się systemu informacyjnego;
- zarządzanie strumieniami danych i modułami systemu informacyjnego na różnych poziomach organizacji ESP i przedsiębiorstwa;
- elastyczna modyfikowalność modułów informacyjnych i szybkozmiennych struktur danych;

- heterogeniczność podsystemów hardware'owych i software'owych systemu informatycznego i jego otoczenia;
- wysoki stopień wiarygodności bezpieczeństwa i poufności danych;
- automatyczna optymalizacja w zakresie parametryzowania i administrowania systemu informacyjnego;
- modularność oraz rozdział danych od korzystającego z nich oprogramowania;
- zgodność z nowoczesnymi normami i standardami światowymi oraz poziomem technologiczno-organizacyjnym przedsiębiorstwa;
- efektywność ekonomiczna i pozaekonomiczna instalacji i eksploatacji systemu informatycznego.

Spełnienie wyżej wymienionych wymogów IT jest niezwykle trudne, nawet w sensie polioptymalizacji. Niezależnie od tego ważnym celem specyfikacji jest pokazanie, że niedoceniając pozatechnicznych aspektów modelowania systemu informacyjnego ESP prowadzi do charakterystycznych zjawisk, określonych mianem „permanentnego kryzysu organizacyjnego IT” [3, 4]. Taki wniosek skłania do zwrócenia szczególnej uwagi na metody organizacji projektu informatycznego ESP.

3.2.4. Organizacja projektu informatycznego

Ramy projektu informatycznego wyznacza model etapowy, a jego odmiany można spotkać w wielu strategiach zarządzania w tej dziedzinie [2]. Ważkim problemem organizacyjnym, występującym we wszystkich etapach projektu, jest usuwanie błędów. Proces ten jest tym kosztowniejszy i bardziej skomplikowany, im wcześniej błąd powstaje i im później zostaje odkryty. Oznacza to, iż najtrudniej jest walczyć z błędami powstającymi na początku projektowania, a stwierdzonymi np. już po odbiorze projektu. W organizacji przedsięwzięcia IT błędy projektowania odgrywają większą rolę niż błędy wykonania (np. programowania); stosunek ilościowy błędów projektowania do błędów wykonania wynosi około 2 : 1. Jednocześnie błędy projektowania stanowią około 3 : 4 wszystkich błędów stwierdzonych już po wykonaniu projektu. Wynika stąd znaczenie pierwszych etapów projektu dla całego czasu życia systemu.

Wadą modelu etapowego jest jego sztywność, która nie uwzględnia, iż w praktyce poszczególne etapy przedsięwzięcia nakładają się na siebie i są procesami iteracyjnymi. Również standardy dokumentacji definiowane są co najwyżej dla poszczególnych faz. Jest to mankament, zwłaszcza dla bardziej złożonych systemów – do których należą ESP. Wynika stąd potrzeba poszukiwania innych metod modelowania dla rozważanej klasy systemów informacyjnych. Praktyka projektowa wymusza korzystanie z szeregu metod i narzędzi wspomagających proces projektowania IT. Niektóre z nich mają charakter uniwersalny (np. burza mózgów przydatna w fazie koncepcyjnej); inne są specyficzne wyłącznie dla projektów informatycznych. Literatura [9, 23, 30, 55] zawiera opisy wielu tego typu technik, wśród nich tak ważne, jak np. HIPO, CD/SD, SADT czy PSL/PSA – wybór ich zależy od konkretnej sytuacji projektowej. Dotyczy to również postaci formy metody, np. stosowanie narzędzi CASE [45]. Praktyka wskazuje, iż najefektywniej jest korzystać ze sprawdzonych i znanych członkom zespołu technik i narzędzi organizacyjnych, nawet jeśli nie są najnowocześniejsze.

Z punktu widzenia organizatora omawiane techniki mają szereg cech wspólnych, takich jak:

- podział zadania projektowego na moduły,

- stosowanie metody „od ogółu do szczegółu” (*top-down*),
- ściśle zdefiniowane standardy dokumentacji (struktogramy, diagramy przepływu itp.),
- daleko idąca eliminacja opisów werbalnych (grafika),
- podatność na korzystanie z narzędzi software’owych w fazie projektowania (np. CASE) [17, 22],
- specyfikacja zbiorów danych w specjalnych słownikach (*data dictionary*).

Metody te mają także wady, z punktu widzenia potrzeb organizacyjnych kompleksowych systemów technicznych:

- monolityczność (pozwala na użycie jednolitej koncepcji kosztem elastyczności metody),
- zamkniętość (ograniczone możliwości łączenia różnych metod),
- algorytmizacja (podstawowa cecha o charakterze obligatoryjnym, przejawiająca się sztywnością definiowanych procedur),
- zawężona systemowość niewystarczająca do pełnienia roli integracyjnej dla otoczenia.

Zagadnienia związane z adaptacją personelu do wymagań systemu informatycznego ESP są jednym z głównych problemów komplikujących wdrażanie tych systemów [26]. Nowe technologie wymagają nowej wiedzy [5], przy czym znaczenie jej elementów jest różne dla różnych grup pracowniczych. Zróżnicowanie to stanowi podstawę planu szkoleń związanego z wdrażaniem systemu. Szkolenie powinno przekazywać zarówno wiedzę faktograficzną (szegóły dotyczące działania poszczególnych modułów systemu), jak i heurystyczną, tj. reguły rozwiązywania problemów o charakterze strategicznym dla danego stanowiska pracy (np. działania w przypadku awarii wynikające z celów funkcjonowania systemu). Praca z systemem bazy danych ESP, mimo zróżnicowanych profili grup pracowniczych, wymaga posiadania szeregu umiejętności, na które winno kłaść się szczególnie nacisk podczas szkoleń oraz w fazie doboru pracowników:

- algorytmiczny sposób myślenia w kategoriach informatycznych,
- rozpoznawanie systemowych związków między komponentami ESP i jego systemem informacyjnym,
- jednoznaczne komunikowanie się (terminologia) wraz z umiejętnością przedstawiania złożonych problemów innym,
- transformowalność wiedzy, tzn. zdolność jej zastosowania w zmiennych sytuacjach,
- świadomość zalet i możliwości nowej technologii, ale również ryzyka z nią związanego (np. bezpieczeństwo danych),
- pokazanie strategii rozwoju systemu informacyjnego ESP jako konsekwencji głównych celów przedsiębiorstwa,
- praca zespołowa jako cel podczas eksploatacji systemu oraz w fazie uczenia się,
- motywowanie do zainteresowania samokształceniem się.

Praktyka przemysłowa wskazuje, że niewłaściwie przygotowane i przeprowadzone szkolenie może doprowadzić nawet do załamania się całej koncepcji wdrażania systemu bazy danych w przedsiębiorstwie. Mimo że wniosek ten wydaje się oczywisty, gdyż wszelkie systemy techniczne tworzone są przez ludzi i dla ludzi, to jednak problem szkoleń w kontekście zarządzania zasobami ludzkimi (*Human Resources* [48]) jest niedoceniany i niewystarczająco dobrze rozwiązany.

3.2.4.1. Polityka personalna

Kolejnym problemem aktualnych projektów informatycznych, w tym z zakresu ESP, jest niedocenianie pozatechnicznych aspektów projektu, a zwłaszcza podstawowych zasad zarządzania – ze specyfiką kierowania zespołami ludzkimi na czele. Konsekwencją tego zjawiska jest wydłużony czas realizacji projektu i spadek jego jakości, a w efekcie pogorszenie wskaźników jakości przedsięwzięcia. Z drugiej strony, powszechnie występuje w praktyce przemysłowej przekonanie, że wdrożenie nowej technologii sprowadza się do zainstalowania nowych środków techniki: sprzętu i oprogramowania. Tymczasem nowe technologie wymagają nowych form organizacji w przedsiębiorstwie. W rozważanym zakresie oznacza to:

- nową wiedzę projektantów i użytkowników systemu,
- nowe formy i treści szkolenia,
- nowe motywacje dla użytkowników systemu.

Szczególnie ten ostatni punkt wymaga dużych wysiłków projektantów w celu przełamania oporów psychologicznych użytkowników. Opory te mogą skutecznie blokować wprowadzenie zmian w systemie informatycznym, co w skrajnym przypadku prowadzi do niepowodzenia projektu. Podstawowym warunkiem pokonania tej przeszkody jest zapewnienie przepływu informacji między osobami zainteresowanymi projektem, co wynika z wniosków teoretyków i praktyków organizacji dotyczących znaczenia komunikacji w przedsiębiorstwie [19, 25].

W związku z tym harmonogram wdrażania systemu informatycznego ESP winien uwzględniać następujące elementy:

- zbieranie potrzeb usprawnienia procesów przetwarzania informacji od użytkowników,
- pokazywanie konieczności zmian w istniejącym systemie w drodze rozmów indywidualnych,
- krótkie prezentacje perspektyw nowego systemu dla różnych grup pracowniczych,
- przygotowanie i rozpowszechnienie przekrojowych materiałów informacyjnych dotyczących zmian,
- szkolenia zbiorowe i indywidualne, wewnętrzne i zewnętrzne,
- utworzenie klubu użytkowników nowego systemu wraz z jego strukturą,
- wyznaczenie wąskiej, dobrze motywowanej i wyszkolonej grupy użytkowników dla wstępnego wdrożenia (testów),
- wspólne przetwarzanie informacji przez projektanta i użytkownika bezpośrednio na docelowym stanowisku pracy.

W dziedzinie polityki personalnej kluczowe znaczenie ma podział systemu informatycznego między jego dwie części: zespół projektowy, w klasycznym wariacie skupiony w dziale technologii informacyjnej – IT (ETO) oraz użytkowników systemu. Współczesne środki informatyki pozwalają na elastyczne przesuwanie granicy między obiema stronami, co w szczególności umożliwia delegowanie zadań rozwoju systemu do jego użytkowników. Stopień delegowania może być znaczny i teoretycznie obejmować nawet niektóre zadania z zakresu administrowania systemem informatycznym, jednak w praktyce dotyczy to głównie indywidualnego formułowania zapytań do systemu, generowania raportów oraz wykonywania pakietów standardowych.

Złożoność systemu informatycznego ESP powoduje, że kierownictwo projektu powierza się często osobie o dużej wiedzy informatyczno-technicznej. Z kolei wiadomo, iż tacy specjaliści często przywiązują mniejszą wagę do psychologiczno-socjologicznych aspektów projektu,

co ma wielkie znaczenie dla efektywności pracy zespołu. Zleceniodawca (kierownictwo firmy) powinien zadbać o uwzględnienie tych elementów przedsięwzięcia, dobierając kierownika projektu i umożliwiając mu odpowiednie poszerzenie wiedzy z tego zakresu.

Prawidłowa polityka personalna zakłada także świadome określenie wielkości zespołu projektowego, co ma wpływ na procesy komunikacyjne między jego członkami. Zależność między produktywnością zespołu a jego liczebnością nie jest wprost proporcjonalna, co pozwala na stwierdzenie, że dla każdego przedsięwzięcia informatycznego istnieje optymalna wielkość zespołu projektowego, której przekroczenie powoduje spadek produktywności zespołu. Efekt ten po części daje się wytłumaczyć specyfiką organizacji procesu projektowania, zakładającą konieczność kontaktowania się członków zespołu, i to często na zasadzie „każdy z każdym”.

3.2.4.2. Efektywność wdrożenia systemu informatycznego ESP

Ocena rozwiązań technicznych odgrywa istotną rolę dla decyzji dotyczących ich wdrażania. Pozytywny lub negatywny wynik takiej oceny może przesądzić o stosowaniu, lub nie, określonej technologii, a także ma wpływ na organizacyjną strategię jej wdrażania [24]. Dotyczy to zwłaszcza technologii nowych – wynika stąd znaczenie metod oceny dla rozwoju komputerowo zintegrowanych ESP. Jednym z elementów tej oceny jest ocena efektywności ekonomicznej rozważanego systemu.

Klasycznym narzędziem takiej oceny jest traktowanie systemu informatycznego ESP jako projektu inwestycyjnego i korzystanie z metod wypracowanych w tym zakresie przez mikroekonomię [29]. Metody te posługują się różnorodnymi wskaźnikami i formułami szczegółowymi [35, 36] dla znajdowania relacji między wartością produkcji a jej kosztami dla określonego czasu i zadanego sposobu finansowania przedsięwzięcia. Systemową koncepcję analizy ekonomiczno-finansowej przedsięwzięć inwestycyjnych w ESP przedstawiono w pracy [40], natomiast dla fazy eksploatacji schemat oceny ESP zawarto w pracy [53].

W fazie planowania inwestycji ESP operuje się przewidywanymi wartościami nakładów i kosztów dla danego projektu oraz porównuje się je z przewidywanymi wartościami efektów wynikających z realizacji projektu. Mimo formalnej precyzji różnorodnych formuł matematycznych, ich główną słabością jest poziom wiarygodności prognozowania. Stwarza to możliwość manipulowania kosztami, a zwłaszcza sumami zakładanych efektów w celu skłonienia instancji decyzyjnych do zatwierdzenia projektu.

Podobnym problemem jest ocena efektywności ekonomicznej systemu informatycznego ESP już w fazie jego eksploatacji. Nowy projekt nie jest izolowanym modułem całego systemu, lecz także – z punktu widzenia ekonomicznego – jego zintegrowanym podsystemem, co utrudnia jednoznaczne określenie kosztów i nakładów z nim związanych. Również w odniesieniu do czynnika czasu, prognozy efektywności przyjmowane są arbitralnie, co waży na ocenie całości, np. rozwiązanie nieefektywne w skali 3 lat może być uznane za rentowne w ciągu dłuższego okresu.

Istnienie tak ważkich problemów upoważnia do stwierdzenia, iż wyniki oceny efektywności ekonomicznej technologii informatycznej ESP bardzo zależą od przyjętych metod pomiarowych. Na trudność tę zwraca uwagę S. Marciniak [30], twierdząc, że mimo wysoce logicznego sposobu konstruowania metody obliczania efektu łącznego ESP, praktyczne zastosowanie tej metody jest bardzo małe. O wiele łatwiejsze jest określenie rentowności przedsiębiorstwa jako całości, niemniej nie rozwiązuje to problemu obliczania efektywności wdrażanego ESP, gdyż:

- wprowadzenie elastycznego systemu produkcji powoduje zmiany w strukturze przedsiębiorstwa, w tym w strukturze kosztów, co utrudnia ich wybiórcze porównywanie w czasie;

— podczas wdrażania i eksploatacji ESP zmianom ulegają parametry jego otoczenia oraz otoczenia przedsiębiorstwa mające wpływ na obliczane efekty.

Sam rachunek kosztów i nakładów nie ujmuje bezpośrednio efektów niewymiernych ESP [27], związanych z poziomem funkcjonalności, elastyczności i integracji w przedsiębiorstwie. Potwierdza to tezę B. Piławskiego [36] o niedefiniowalności (niemierzalności) postępu technicznego w ogólnym przypadku. Jeszcze trudniejszy jest pomiar efektów związanych ze społecznymi, czy prawnymi skutkami wprowadzania elastyczności i związanego z nią systemu informatycznego⁴⁾. Zagadnienia te z całą jaskrawością występują podczas obliczania (szacowania) efektywności systemów informatycznych. Wynika to głównie z braku metod umożliwiających kontekstowy pomiar informacji. Na podstawie analizy pojęcia informacji, opisywanego przez różnych badaczy, w tym także klasyków teorii informacji N. Wienera i C. Shannona, S. Chajtman [11] również stwierdza, iż zagadnienie pomiaru informacji nie zostało jeszcze w pełni rozwiązane naukowo. Rozwinięcie teoretycznych podstaw nauki o informacji znajdujemy w pracy Klira.⁵⁾

Większość kosztów projektu informatycznego, to koszty osobowe i oprogramowania. Koszty sprzętu są w dużej mierze niezależne od projektanta, gdyż ich ramy są normowane przez sprzedawców. Oczywiście nie zwalnia to z konieczności prowadzenia starannej analizy tych kosztów pod kątem ich celowości i struktury. Głównym problemem szacowania nakładów projektu informatycznego jest jednak planowanie czasu projektu i związane z tym koszty osobowe oraz koszty tworzenia oprogramowania [13]. Rynek oferuje tutaj interesujące pakiety software'owe umożliwiające komputerowe wspomaganie procesu planowania. Narzędzia takie generują m. in. diagramy PERT, czy wykresy Gantta w różnych wariantach [20, 49], ale ich przydatność praktyczna wynika głównie z poziomu wiarygodności danych wejściowych.

Również szacowanie kosztów dla określonego typu projektów, np. obiektowo-zorientowanych, związane jest ze zbieraniem dużej ilości specyficznych danych empirycznych [42]. Wynika z tego również, że dalsze uszczegółowienie formuł o precyzyjniejszą skalę ocen i większą ilość czynników jest niecelowe. Wyprowadzanie uniwersalnych wzorów dla rozważanego wskaźnika efektywności nie miałoby praktycznej wartości naukowej. Obliczanie efektywności ekonomicznej samego projektu informatycznego metodami klasycznymi ma pełne uzasadnienie w przypadku sprzedaży usług i produktów informatycznych. W większości sytuacji inwestycje informatyczne stanowią jednak koszt w przedsiębiorstwie czerpiącym zyski z produkcji innych wyrobów i usług. Dla całości systemu możliwe jest więc zastosowanie metodologii Banku Światowego i UNIDO do oceny przedsięwzięć inwestycyjnych [52], natomiast w przypadku informatycznych systemów zarządzania konieczne jest poszukiwanie innych miar oceny niż tylko wyrażane w pieniądzu.

Niezależnie od tego stwierdzenia, dalej podano przykład struktury kosztów przedsięwzięcia informatycznego ESP.

1. Koszty badań przedprojektowych

a) koszty sformułowania idei projektu:

— koszty wstępnej rejestracji parametrów systemu istniejącego,

⁴⁾ Próbę taką zawiera m.in. praca J. Ilczuka, M. Jerczyńskiej: Efektywność systemów informatycznych zarządzania. Warszawa: PWE 1979.

⁵⁾ Klir G. J.: Uncertainly and Information. New Jersey: John Wiley & Sons 2006.

- koszty określenia podstawowych problemów przez użytkowników,
- koszty wskazania ogólnego kierunku rozwoju IT w przedsiębiorstwie;
- b) koszty studium wstępnego:
 - koszty niezbędnych badań marketingowych dla potrzeb IT,
 - koszty sformułowania prognozy rozwoju systemów baz danych i ich otoczenia,
 - koszty oszacowania wzrostu zapotrzebowania na informacje w przedsiębiorstwie,
 - koszty porównania posiadanego systemu informacyjnego z rozwiązaniami konkurencji,
 - koszty określenia założeń proponowanych rozwiązań.

2. Koszty sformułowania idei optymalnego rozwiązania

- a) koszty tworzenia zbioru idei:
 - koszty zastosowania technik pracy twórczej,
 - koszty gromadzenia idei w ramach przedsiębiorstwa i z zewnątrz;
- b) koszty opracowania modelu rozwiązania idealnego:
 - koszty określenia ograniczeń modelu,
 - koszty pokazania funkcji rozwiązania,
 - koszty naszkicowania dróg realizacji rozwiązania.

3. Koszty analizy stanu faktycznego

- a) koszty przygotowania analizy:
 - koszty wyspecyfikowania obszaru analizy,
 - koszty kompletowania wewnątrzzakładowej dokumentacji przygotowawczej,
 - koszty przygotowania osób i metod dla przeprowadzenia analizy,
- b) koszty przeprowadzenia analizy:
 - koszty celowej obserwacji badanego obszaru,
 - koszty przeprowadzania wywiadów w przedsiębiorstwie,
 - koszty badania istniejącej dokumentacji aktualnego systemu bazy danych,
 - koszty zdefiniowania problemów w kategoriach informatycznych,
 - koszty specyfikacji wymagań użytkowników,
 - koszty przygotowania dodatkowych zestawień i statystyk w przedsiębiorstwie,
 - koszty testów analitycznych w dziale IT,
 - koszty opisu procesów informacyjnych;
- c) koszty syntezy wyników analizy:
 - koszty weryfikacji zebranych danych,
 - koszty strukturyzacji posiadanych informacji,
 - koszty opisu wyników założoną metodą.

4. Koszty opracowania koncepcji zgrubej

- a) koszty fachowej specyfikacji głównych problemów:
 - koszty uszczegółowienia zadania projektowego,
 - koszty opisu znalezionych problemów;
- b) koszty fachowej specyfikacji alternatywnych rozwiązań:
 - koszty opisu możliwych rozwiązań,
 - koszty określenia ograniczeń znalezionych rozwiązań,
 - koszty fachowej specyfikacji planu realizacji projektu.

5. Koszty opracowania koncepcji szczegółowej

- a) koszty przygotowania zadań hardware'owych:
 - koszty zestawienia instalacji i modyfikacji sprzętowych,
 - koszty analizy rynku hardware'owego,
 - koszty opracowania planu zakupów,
 - koszty specyfikacji inwestycji nieinformatycznych wynikających z projektu;
- b) koszty przygotowania zadań software'owych:
 - koszty zestawienia instalacji i modyfikacji software'owych,
 - koszty analizy rynku software'owego,
 - koszty specyfikacji problemu w kategoriach informatycznych,
 - koszty opracowania planu zakupów,
 - koszty specyfikacji modyfikacji towarzyszących;
- c) koszty przygotowania zadań organizacyjnych:
 - koszty określenia harmonogramów koordynacyjnych,
 - koszty sporządzenia planu osobowego,
 - koszty przygotowania planu szkoleń.

6. Koszty wykonania projektu

- a) koszty konfigurowania sprzętu:
 - koszty zakupu sprzętu,
 - koszty zakupu oprogramowania systemowego i telekomunikacyjnego,
 - koszty szkoleń sprzętowych IT,
 - koszty instalacji sprzętu,
 - koszty testów sprzętowych;
- b) koszty implementacji oprogramowania:
 - koszty zakupu oprogramowania narzędziowego,
 - koszty szkoleń software'owych IT,
 - koszty kodowania,
 - koszty programowania,
 - koszty wykonania dokumentacji użytkowej.

7. Koszty testowania rozwiązania

- a) koszty przygotowania testów:
 - koszty przygotowania danych testowych,
 - koszty przygotowania konfiguracji;
- b) koszty przeprowadzenia testów:
 - koszty testów modułowych,
 - koszty testu generalnego IT.

8. Koszty integracji organizacyjnej

- a) koszty parametryzacji systemu:
 - koszty parametryzacji sprzętu,
 - koszty parametryzacji oprogramowania;
- b) koszty szkoleń użytkowników:
 - koszty szkoleń wewnętrznych,
 - koszty szkoleń poza firmą;
- c) koszty wdrożenia:

- koszty instalacji oprogramowania i sprzętu użytkowników,
- koszty próbnej eksploatacji.

9. Koszty użytkowania

- a) bieżące koszty eksploatacji:
 - koszty gotowości systemu,
 - koszty serwisu sprzętu i oprogramowania,
 - koszty napraw i bieżących modyfikacji oprogramowania;
- b) koszty rozwoju systemu:
 - koszty bieżącej analizy systemu,
 - koszty aktualizacji i modyfikacji oprogramowania,
 - koszty modernizacji sprzętu.

Koszty te objawiają się w postaci wymiernych czynników projektu, co przykładowo wyspecyfikowano niżej:

- cena jednostek centralnych (procesory operacyjne i telekomunikacyjne, pamięci operacyjne i ich rozszerzenia),
- cena dysków (magnetyczne, magnetoptyczne),
- cena drukarek (zdalne i lokalne),
- cena terminali (klawiatury, monitory, lokalne pamięci i dodatkowe urządzenia zewnętrzne),
- cena urządzeń taśmowych (jednostki taśm i kaset magnetycznych),
- cena urządzeń CD-ROM, WORM,
- cena urządzeń teletransmisyjnych (modemy, karty sieciowe, infrastruktura LAN/WAN),
- cena innych urządzeń zewnętrznych (skanery, plotery, czytniki nośników danych itp.),
- cena urządzeń specjalnych (USV, przełączniki i in.),
- cena oprogramowania centralnego (operacyjne, narzędziowe, specjalne, licencje centralne),
- cena oprogramowania lokalnego (operacyjne, specjalistyczne, biurowe, licencje lokalne),
- pomieszczenia dla urządzeń centralnych (powierzchnia, klimatyzacja, zabezpieczenia, instalacje),
- powierzchnia robocza dla urządzeń lokalnych (specjalne pomieszczenia, dodatkowa powierzchnia robocza i meble, instalacje lokalne),
- zużycie energii elektrycznej (centralnie, lokalnie),
- opłaty telekomunikacyjne (poczta elektroniczna, transfer danych, wideokonferencje),
- opłaty spedycyjne (przesyłki z nośnikami danych, sprzętem, oprogramowaniem, dokumentacją, raportami),
- usługi zewnętrzne (moc obliczeniowa i in.),
- zużycie papieru (poszczególne typy centralnie i lokalnie),
- zużycie nośników magnetycznych (dyskiety, kasety, taśmy, dyski wymienne) i optycznych,
- zużycie materiałów do drukowania (tonery, taśmy barwiące, atrament i in.),
- cena aktualizacji oprogramowania (różne rodzaje),
- wymiana zużytego sprzętu,
- pracownicy centralni (operatorzy, technicy, programiści, kierownicy zespołów, analitycy, organizatorzy itp.),

- pracownicy innych firm (delegowanie zadań),
- czas pracy z systemem na wydziałach (dostęp do danych, obsługa raportów, analiza danych, obsługa sprzętu i oprogramowania),
- serwis sprzętu i oprogramowania,
- szkolenia własne i zewnętrzne.

3.2.5. Składniki technologii informatycznej ESP

Błędem spotykanym niekiedy podczas projektowania systemów informatycznych ESP jest traktowanie ich modułów jako zamkniętych całości, bez uwzględnienia powiązań z innymi elementami systemu. Nie umniejszając znaczenia platformy hardware'owej, na której instalowany jest system, w niniejszym punkcie zajmiemy się software'owymi elementami informatycznego otoczenia bazy danych; natomiast w dalszej części nawiążemy do typologii sieci komputerowej systemu informatycznego, proponując rozwiązania uwzględniające najnowsze tendencje w tej dziedzinie.

Języki programowania są ciągle ważnym instrumentem komunikowania się użytkownika z systemem informatycznym. Również w obliczu dynamicznego rozwoju narzędzi wspomagających generowanie aplikacji („graficzne” języki programowania, CASE – *Computer Aided Software Engineering*) języki programowania są nadal ważne dla modelowania systemu informatycznego. Dotyczy to zarówno języków specjalistycznych, jak i współpracujących z nimi języków wysokiego poziomu (3GL, 4GL). Z kolei dla elastycznego systemu produkcji innowacyjna modyfikacja skojarzonego z nią systemu informacyjnego może być trudniejsza od projektowania i implementowania nowego systemu od podstaw. Tak więc stosowana metoda modelowania systemu informatycznego i jego otoczenia nie może być tylko kwestią decyzji użycia określonych standardów programowo-sprzętowych, ale winna uwzględniać także heterogeniczność istniejących i nowych rozwiązań.

Podobnie jak w zakresie języków programowania, również wśród systemów operacyjnych konfiguracji komputerowych ESP, dominują produkty 3. i 4. generacji, niezależnie od różnic w ich definiowaniu. Dobór systemu operacyjnego ma istotny wpływ na funkcjonalność systemu informatycznego ESP w następujących aspektach:

- szybkość działania systemu (zarządzanie zasobami),
- wieloużytkowość i wieloprosesowość (równoczesny dostęp i przetwarzanie danych),
- architektura bazy danych (klient-serwer),
- bezpieczeństwo danych na poziomie systemu operacyjnego (administracja),
- ergonomia systemu informacyjnego (interfejs użytkownika),
- otwartość systemu informatycznego (łączność z innymi systemami).

Po stronie użytkownika, częstym rozwiązaniem jest stosowanie konfiguracji PC, jako terminali systemu informatycznego. Dominującym systemem operacyjnym jest tutaj MS-DOS lub kompatybilny z rozszerzeniem MS-Windows. Wykorzystywane są także inne powierzchnie graficzne (OSF/Motif) i systemy operacyjne (OS/2), jednak dla architektury systemu informatycznego podstawowe znaczenie ma system operacyjny po stronie serwerów. Wyróżnić tu można dwie główne grupy systemów operacyjnych: systemy dla dużych komputerów (*mainframe*) typu zamkniętego i systemy otwarte typu UNIX. Dużą dynamikę rozwoju wykazuje także system Windows NT [47] aspirujący do roli rozwiązania uniwersalnego o szerokiej skalowalności, a także Delphi (3,4).

Aby system informatyczny spełniał rolę integracyjną dla elastycznego systemu produkcji, skojarzony z nim system operacyjny winien być jak najbardziej otwarty (*open*

system). Wymóg ten spełniają w znacznym stopniu systemy typu UNIX („unixopodobne”), aczkolwiek stopień ich otwartości jest kwestią poziomu standaryzacji w tym zakresie – istnieje wiele odmian tego systemu [6, 8]. I tak przenośność tego typu systemu operacyjnego może istnieć na poziomie kodu źródłowego (język C), ponadto przyszłościowo gwarantuje on największą otwartość, jako system niezależny hardware’owo. W tym kontekście duże znaczenie mają prace instytucji normatywnych: amerykańskiego instytutu IEEE, ISO, a także zrzeszeń producentów komputerowych: OSF (ang. *Open System Foundation*) UI (*Unix International*) USL (ang. *Unix System Laboratories*).

Systemy „unixopodobne” mają szereg cech, które pozwalają na stosowanie ich jako podstawowego systemu elastycznego systemu produkcji. Niemniej, jak w każdym systemie operacyjnym, tak i tutaj jego specyfika wymaga dopasowywania (aplikowania) funkcji systemu do potrzeb efektywnego zarządzania systemem. Przy poszukiwaniu optymalnych rozwiązań w tym zakresie, nie można pominąć faktu, iż możliwe jest stosowanie kompleksowych pakietów zarządzania produkcją [6, 18]. Oprogramowanie takie wykazuje szereg wad pakietów oferowanych „pod klucz”. Tak więc bogata oferta gotowego oprogramowania zarządzającego elastycznymi systemami produkcji nie umniejsza znaczenia poszukiwania innych metod modelowania informatycznego dla tych systemów.

3.2.5.1. Bazy danych elastycznego systemu produkcyjnego

Poniżej ocenione zostaną podstawowe cechy wybranych baz danych, przy czym skoncentrowano się głównie na tych systemach, które są niezależne od platformy hardware’owej. Oferowane na rynku standardy baz danych mają istotne znaczenie dla konstruowanego systemu informacyjnego ESP. Powszechną bowiem praktyką w przedsiębiorstwach produkcyjnych jest stosowanie gotowych produktów oferowanych przez duże firmy software’owe. Jest to całkowicie uzasadnione, gdyż nawet duże przedsiębiorstwo nie jest w stanie konkurować w tym zakresie z wyspecjalizowaną firmą software’ową, która zatrudnia setki, a nawet tysiące osób zajmujących się od lat rozwojem określonej bazy danych.

Przyjęty model danych stanowi podstawową cechę każdej bazy danych – w zależności od niego mówi się więc np. o relacyjnych bazach danych, jeśli korzystają one z relacyjnego modelu danych itp. Istnieje obecnie próba stworzenia uniwersalnego języka opisu różnych typów baz danych UML (ang. *Unified Modelling Language*) [29], umożliwiających jednolity dostęp do wszelkich zasobów znajdujących się w systemie informacyjnym ESP, a więc do innych typów reprezentacji atrybutów obiektów świata rzeczywistego niż liczby, słowa, czy krótkie teksty. Kierunek ten wykazuje dużą dynamikę rozwoju w kontekście technologii obiektowych (*object oriented*).

Problematyka orientacji obiektowej w modelowaniu i analizie systemów informatycznych jest w ostatnich latach przedmiotem zainteresowań wielu badaczy i powstały na ten temat liczne publikacje. Większość proponowanych podejść ma wspólną bazę pojęciową i metodyczną, a występujące różnice są nieznaczne. Opisy różnych metodyk modelowania obiektowego ujmują m.in. prace: Jacobsona⁶⁾, Eriksona⁷⁾ oraz [3: 9, 10], natomiast bazy danych w systemach obiektowych oraz charakterystyka ich języków programowania zawar-

⁶⁾ Jacobson I., Christerson M., Jonnsen P., Overgarol G.: *Object – Oriented Software Engineering*. Addison-Wesley Pub. Comp. 1992.

⁷⁾ Eriksson H. E., Penker H.: *UML Toolkit*. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc. 1997.

te są w pracy [1: 68]. Wykorzystanie orientacji obiektowej w modelowaniu ESP przyczyni się w przyszłości do podniesienia efektywności ich wdrażania.

Szacuje się, że obecnie znaczna część informacji znajdujących się w bazach danych ESP, zapamiętanych jest nadal w systemach hierarchiczno-sieciowych. Natomiast jeśli chodzi o liczbę instalacji, to bez wątpienia dominującą klasą są systemy relacyjne. Inne systemy, w tym obiektowe, odgrywają mniejszą rolę jeśli chodzi o podstawowe bazy danych ESP; mogą natomiast mieć istotne znaczenie dla specjalistycznych rozwiązań, np. w zakresie CAD/CAM/CIM.

W hierarchiczno-sieciowych bazach danych standardu CODASYL oparcie języków DDL (ang. *Data Description Language*) i DML (ang. *Data Manipulation Language*) na COBOL-u powoduje, że tego typu bazy danych umożliwiają tworzenie dobrze standaryzowanych aplikacji o charakterze samodokumentującym się. Odbywa się to wszakże kosztem elastyczności projektowania i eksploatacji bazy danych. Proces generowania bazy danych jest z reguły skomplikowany i mało przyjazny dla użytkownika. Wad tych nie niweluje szybkość dostępu do danych w bazie, wynikająca z istnienia hierarchii między obiektami. Bazy danych tworzące takie powiązania *ad hoc*, w trakcie wykonywania się programu z zapytaniem, mają bowiem dodatkowe mechanizmy pozwalające na sprawną selekcję danych.

Niedostatki CODASYL-owskich baz danych mogą być zmniejszane poprzez korzystanie z mieszanych modeli danych – również z językiem SQL, gdzie oba modele danych (CODASYL + relacyjny) pozostają niezależne od siebie w jednej bazie danych, a aplikacje relacyjne mogą korzystać z danych zapamiętanych w obu strukturach; należy jednak przyjąć, że bazy danych tego typu będą nadal sukcesywnie zastępowane przez modele nowocześniejsze.

Sytuacja w obszarze relacyjnych baz danych jest typowa dla innych rodzajów softwaru – podobnie jak wśród języków programowania, których są setki, ale tylko kilkanaście ma duże znaczenie w praktyce przemysłowej. Spośród wielu dostępnych na rynku baz danych zwrócono uwagę zwłaszcza na te, które są niezależne od platformy hardware'owej i w związku z tym – aczkolwiek w różnym stopniu – gwarantują otwartość systemu. Im większa bowiem otwartość systemu informatycznego, tym większa elastyczność obsługiwanego przezeń systemu produkcji. Świadomie zrezygnowano więc z rozpatrywania całej grupy, w wielu aspektach nowoczesnych baz danych, jeśli nie spełniają one kryterium otwartości.

Z podobnych względów pomija się zatem bardzo liczną grupę baz danych zaprojektowanych dla mniejszych komputerów, głównie dla środowiska DOS/Windows [20]. Systemy te, mimo wysokiego stopnia przyjazności dla użytkownika (*user-friendly*), nie mogą jednak pretendować do roli uniwersalnych baz danych elastycznego systemu produkcji. Skoncentrowano się dalej na bazach danych średniej techniki obliczeniowej (*middle data technology*), uznając za reprezentatywne produkty firm: SYBASE, ORACLE, INFORMIX i INGRES. Celem niniejszego rozdziału nie jest wszakże prezentacja szczegółów dotyczących tego oprogramowania, dostępnych w odpowiedniej dokumentacji firmowej, a jedynie formułowanie wniosków związanych z poruszonym tematem.

Metodyka pomiarów podstawowego parametru wydajności baz danych, jakim jest liczba transakcji na sekundę TPS (ang. *Transactions Per Seconds*) nie jest jednoznaczna, co powoduje, że podawane przez producentów wartości nie mogą być traktowane w sposób absolutny. Ów stan rzeczy wynika w dużej mierze z braku jednoznacznej definicji transakcji, która mogłaby być podstawą porównań. Z tego samego powodu także cena

transakcji obliczana jako wartość konfiguracji/TPS jest relatywna, choć bardziej miarodajna, gdyż uwzględnia techniczne uwarunkowania środowiska testowego.

Wydajność bazy danych (*performance*) w dużym stopniu zależy od sposobu implementacji jej serwera. Relacyjne bazy danych, instalowane na dedykowanych serwerach SQL, wymagają co najmniej architektury typu: jeden proces/jeden użytkownik. Jeszcze lepszym rozwiązaniem jest architektura typu wielowątkowego (*multi-threaded* [7]). Rozwiązanie takie przyspiesza działanie bazy danych oraz zmniejsza zapotrzebowanie na pamięć operacyjną serwera dla użytkownika.

Funkcjonalność relacyjnej bazy danych w dużej mierze zależy od poziomu stosowanego standardu języka SQL [16]. Rozważane bazy danych mają możliwość tworzenia aplikacji również z wykorzystaniem innych języków programowania z osadzonym (*embedded*) SQL. W zależności od wersji bazy danych, paleta dostępnych języków programowania może być szeroka i obejmować takie produkty, jak np.: Ada, C, Cobol, Fortran, PL/1 czy Pascal.

Poza samym jądrem programowym bazy danych (*engine*) istotne znaczenie dla możliwości jej stosowania w elastycznym systemie produkcyjnym ma bogactwo oferowanych modułów bezpośrednio z nią współpracujących. Do najważniejszych komponentów należą tu interfejsy sieciowe, generatory masek, raportów i grafiki prezentacyjnej. Wysoki poziom otwartości i współpracy z różnymi konfiguracjami hardware'owo-software'owymi, gwarantuje ORACLE. Firma ta ma również mocną pozycję na polskim rynku oprogramowania [15]. Bazy danych ORACLE mogą pracować w praktyce na sprzęcie dowolnego producenta, pod dowolnym systemem operacyjnym. Otwartość innych baz danych jest różnicowana, nawet jeśli produkty te są projektowane z założenia jako uniwersalne.

Poza szybkością, relacyjne bazy danych elastycznych systemów produkcyjnych winien cechować wysoki poziom bezpieczeństwa danych. Dla zachowania spójności niezbędne jest przetwarzanie transakcyjne, dla zagwarantowania którego stosuje się dzienniki zmian (*log file*) i segmenty odwołania (*rollback segments*). Bezpieczeństwo danych podnosi też dwufazowe zatwierdzenie (*two phase commit*) i duplikowanie danych (*mirroring*).

Tworzenie takiego modelu bazo-danowego dla kompleksowego systemu ESP wymaga zastosowania wysoce efektywnych metod analizy systemowej. Możliwości takie dają metody obiektowe [13, 44]. Zastosowanie tych metod nie przesądza o konieczności stosowania obiektowych baz danych. Dopiero w najbliższej przyszłości należy spodziewać się rozpowszechnienia się tego typu systemów [38, 47] na szeroką skalę. Bez wątpienia jednak konsekwentne stosowanie filozofii obiektowej – podczas całego procesu tworzenia systemu bazy danych – prowadzi do lepszych wyników niż metodologia tradycyjna, co wynika z następujących powodów:

- metody obiektowe są rozszerzeniem metod dotychczasowych,
- opisywany w modelu świat rzeczywisty składa się z obiektów,
- operacje w procesie elastycznej produkcji mogą być modelowane łącznie z produktami (typowa cecha obiektu),
- podejście obiektowe dobrze nadaje się do modelowania struktur kompleksowych, a jednocześnie szybkozmiennych (elastycznych),
- koncepcja klas odzwierciedla relacje występujące zarówno w systemie zarządzania bazą danych, jak i między obiektami znajdującymi się w bazie,
- dziedziczenie gwarantuje, że niezbędne zmiany w systemie bazy danych (organizacyjne i w strukturach danych), wymuszone zmianami w otoczeniu, zredukowane są do minimum,

- polimorfizm umożliwia skalowanie znalezionych rozwiązań, tj. stosowanie ich w systemach rzeczywistych o różnej wielkości,
- hermetyzacja sprzyja zwiększeniu modularności rozważanego systemu.

Mimo słabo rozwiniętego krajowego piśmiennictwa dotyczącego zastosowań technologii obiektowych, ramy niniejszej pracy nie pozwalają na szerszą analizę tej tematyki. Zakłada się, że konsekwentne zastosowanie takiego podejścia na gruncie organizacji i zarządzania mogłoby przyczynić się do przełomowych zmian w tych naukach, na podobnej zasadzie jak ma to miejsce we współczesnej informatyce. Weryfikacja tego stwierdzenia wymaga odrębnych badań.

W latach 70. powstały standardy pierwszych metod analizy strukturalnej, spośród których do dziś jednym z najważniejszych jest metoda opublikowana przez deMarco [13]. Obecnie stosowane są także inne tego typu metody, takie jak SADT czy CD/SD, powstałe zarówno w ośrodkach naukowych (np. PSL/PSA – Uniwersytet Michigan), jak i w wielkich korporacjach przemysłowych (HIPO – IBM). Doświadczenia projektantów potrafiących konsekwentnie i systematycznie korzystać z takich metod są przydatne przy przechodzeniu do modelowania obiektowego.

Należy podkreślić, że obiektowo-zorientowane metody analizy systemowej powstały niemal ćwierć wieku później niż pierwsze obiektowo-zorientowane koncepcje początkowo stosowane w językach programowania (klasy i obiekty w SIMULI, rok 1967); dla analizy obiektowo-zorientowanej fundamentalne znaczenie mają publikacje Eda Yourdona, a zwłaszcza praca [13] z opisem metody OOA (ang. *Object-Oriented Analysis*). Obecnie istnieje co najmniej kilkanaście kompleksowych metod analizy obiektowo-zorientowanej [12, 44] – przykładem wydajnej metody może być np. Object Modeling Technique [40] opracowana przez specjalistów General Electric, jak również w pracy J. Martina i J. J. Odella.⁸⁾

Jednym z podstawowych warunków efektywnego modelowania systemu bazy danych jest komputerowe wspomaganie tego procesu, nie wynika z tego wszakże, iż będą użyte specjalne pakiety software'owe dopasowane do wybranej metody modelowania. Dla wyżej wymienionej metody pakietem takim jest Object Maker firmy MARK V Systems Inc. (USA), który może być również stosowany w połączeniu z innymi metodami analizy obiektowo-zorientowanej. Alternatywnym pakietem, także o uniwersalnym charakterze, jest PRODC SYSTEM firmy Intelligent Systems Inc., USA (nie jest przeznaczony dla Object Modeling Technique).

Biorąc pod uwagę dotychczasowe osiągnięcia technologii analizy obiektowej oraz aktualne możliwości jej implementacji w pakietach software'owych, dostępnych aktualnie na rynku, istnieje konieczność znalezienia metody umożliwiającej ich konsolidację. Aktualnie istniejące w tym zakresie metody sprowadzają się do dwóch tendencji:

- bezpośredniego zastosowania obiektowych baz danych,
- dodawania mechanizmów obiektowej orientacji do istniejących systemów baz danych.

W pierwszym przypadku stajemy przed wyborem słabo standaryzowanych systemów pochodzących od niewielkiej grupy małych firm software'owych. Przede wszystkim zaś rozwiązanie takie w niewielkim stopniu uwzględnia fakt, iż wiele stosowanych w praktyce systemów baz danych ESP opiera się na modelach relacyjnych lub nawet hierarchiczno-sieciowych. Podejście to jest jednak uzasadnione teoretycznie, obiecujące na przyszłość

⁸⁾ Martin J., Odell J. J.: Podstawy metod obiektowych. Warszawa: WNT 1997.

i może być obecnie traktowane jako możliwy wariant o charakterze specjalnym. W drugim przypadku mamy do czynienia z rozwiązaniem przejściowym, sensownym wszędzie tam, gdzie decydujemy się na proces migracji systemowej do obiektowych baz danych. Wariant ten, w złagodzonej formie, wykazuje wady rozwiązania pierwszego, w szczególności zaś wymaga zakupu dodatkowego oprogramowania.

Wyjściem z powyższych dylematów jest interpretacja wyników analizy obiektowej w kategoriach relacyjnych, co ma charakter koegzystencyjny. Modelowanie takie wykazuje cechy heterogeniczne, pozwalając na współistnienie (koegzystencję) różnych paradygmatów modelowania bazy danych, w ramach jednej metody. Metoda taka koresponduje także z postulatem prymatu modelu informacji nad modelem danych. Punktem wyjścia dla takiej metody może być analiza OOA, której cechą jest m. in. elastyczne modelowanie związków między tematami, niezależnie od czynnika czasu, co odpowiada modelowi relacyjnemu. Jej podstawą jest odpowiednia transformacja wyników analizy w postaci wyspecyfikowanych klas-i-obiektów, struktur, tematów, atrybutów i usług.

3.2.5.2. Struktura konfiguracji sprzętowej

Znaczenie doboru sprzętu i oprogramowania dla osiągnięcia optymalnych parametrów przez rozważany system bazy danych przedstawiono wcześniej na przykładzie systemów operacyjnych i baz danych. Dla architektury systemu informatycznego ESP szczególnie ważny jest wniosek, w którym wskazano na systemy otwarte (klient/serwer). Pierwszoplanowej roli tych systemów w obecnym rozwoju technologii informatycznej nie podważają istniejące alternatywy, wynikające głównie ze wzrostu mocy specjalizowanych konfiguracji wieloprocesorowych. Przyjęcie otwartych architektur klient/server (C/S) [34] za podstawę hardware'owo-software'ową konstruowanego systemu informatycznego wymaga określenia typu konfiguracji, co jest zagadnieniem słabo akcentowanym w przedmiotowej literaturze.

Traktując system informatyczny jako zbiór aplikacji, możemy w każdej z nich wyróżnić 3 główne warstwy:

- 1) warstwa dostępu do danych – DD,
- 2) warstwa logiki oprogramowania – LO,
- 3) warstwa prezentacji – P.

Rozkład tych warstw między serwerem a klientem decyduje o typie poszukiwanej architektury. Należy wyraźnie podkreślić, iż typ ten jest zależny przede wszystkim od zastosowanego oprogramowania, a nie od konfiguracji sprzętowej. W szczególności przyjmuje się, iż możliwe są architektury C/S realizowane na jednym komputerze, co ma wszakże drugorzędne znaczenie praktyczne. Dla ścisłości wywodu uwzględnia się ten typ architektury w klasyfikacji jako typ monolityczny (*monolithic*). Wiele istniejących w praktyce systemów komputerowych należy do tego typu i ich przynależność do klasy C/S ma charakter czysto teoretyczny, mimo optycznego podobieństwa do nowoczesnych architektur C/S (możliwość fizycznego wyróżnienia komputera centralnego, pełniącego rolę serwera w sensie hardware'owym oraz współpracujących z nim terminali – „klientów”). Monolityczne systemy obsługujące sieć terminali nazywa się niekiedy systemami file/serwer – F/S, przy czym tę samą nazwę stosuje się też do określenia roli dedykowanego serwera w sieci komputerowej.

Wychodząc z przyjętego 3-warstwowego modelu aplikacji w nietrywialnym przypadku, możemy przyporządkować klientowi tylko warstwę prezentacji lub warstwę prezentacji

i logiki oprogramowania. Ponadto w dalszych trzech wariantach możemy podzielić jedną z trzech warstw między klienta i serwer. Mamy więc do wyboru 5 rodzajów organizacji C/S:

- 1) rozproszona prezentacja (dostęp do danych i logika oprogramowania po stronie serwera),
- 2) zdalna prezentacja (prezentacja po stronie klienta),
- 3) rozproszona logika oprogramowania (dostęp do danych po stronie serwera, prezentacja po stronie klienta),
- 4) zdalny dostęp do danych (dostęp do danych po stronie serwera),
- 5) rozproszony dostęp do danych (prezentacja i logika oprogramowania po stronie klienta).

Widać wyraźnie, że organizacje te decydują o obciążeniu systemem bazy danych jednej lub drugiej strony (*downsizing*). Obciążenie to warunkuje wykorzystanie zasobów systemu (głównie czasu i pojemności dysków) po stronie klienta lub serwera. W skrajnym przypadku rozproszonej prezentacji, niemal cała aplikacja znajduje się po stronie serwera. Jest to korzystne, gdy po tej stronie dysponujemy odpowiednią pojemnością dysków i gdy serwer ma odpowiednią moc (pamięć operacyjna, procesory), aby zagwarantować wymaganą przez użytkownika wydajność. W przypadku rozproszonego dostępu do danych, aplikacja jest bardziej zależna od parametrów po stronie klienta.

Dla całości konfiguracji krytycznym elementem są także procesy transmisji danych – obciążenie sieci. Parametryzacja sieci (*tuning*) jest kompleksowym problemem wykraczającym poza ramy niniejszej pracy. Z reguły w przypadku 1. możemy liczyć się z niewielką ilością transmisji dużych pakietów danych, natomiast w wariancie 5. mamy do czynienia z większą ilością transmisji mniejszych pakietów. Przypadki 2., 3., 4. są rozwiązaniami pośrednimi, aczkolwiek obliczenia obciążenia sieci możliwe są tylko dla konkretnej aplikacji.

Niezależnie od wyżej wymienionych efektów operatywnych, sposób podziału systemu bazy danych i jej otoczenia między klientów i serwery ma strategiczne znaczenie dla rozwoju technologii informatycznej przedsiębiorstwa. Dla systemów informatycznych ESP należy dążyć do przesuwania aplikacji w stronę klientów, co wiąże się z następującymi konsekwencjami:

- odciążenie działu IT/ETO – redukcja kosztów osobowych,
- delegowanie pielęgnacji systemu informatycznego w kierunku użytkowników,
- zwiększone wymagania kwalifikacyjne dla użytkowników – szkolenia,
- wzrost zagrożeń związanych z bezpieczeństwem danych,
- pogorszenie stabilności sieci,
- większa elastyczność systemu informacyjnego,
- lepsza integracja systemu produkcyjnego z jego systemem informatycznym,
- polepszenie poziomu otwartości systemu informatycznego.

Kolejnym elementem konstruowanego modelu jest wybór między dwu- i trzywarstwowym modelem C/S. Wyżej omówione warianty nie przesądzą o liczbie warstw architektury, niemniej odnoszą się bezpośrednio do modelu dwuwarstwowego, tzn. składającego się z warstwy klienta i warstwy serwera. Możliwe jest rozbitcie warstwy serwera na 2 części: serwer dostępu do danych + serwer logiki aplikacji i stworzenie architektury C/S/S. Rozwiązanie takie podnosi elastyczność systemu bazy danych, ma jednak następujące wady:

- wyższy koszt software'u,
- wzrost kompleksowości systemu bazy danych,
- dłuższe czasy implementacji.

Porównanie rozważanych architektur wskazuje na wystarczającą w praktyce przemysłowej efektywność konfiguracji dwuwarstwowej, tym bardziej, że narzędzia software'owe oferowane przez wytwórców dużych systemów baz danych funkcjonalnie odpowiadają pakietom składającym się na rozwiązania C/S/S.

W ostatnich latach obserwuje się szeroki zakres aplikacji różnorodnych architektur sieci komputerowych w rozproszonych sieciach przemysłowych. Przykłady zastosowań ujmują m.in. następujące publikacje: [24, 29, 35, 47].

3.2.6. Perspektywy technologii informatycznych ESP

Dynamiczny rozwój w dziedzinie przemysłowych systemów informacyjnych pozwala oczekiwać następujących efektów w bliskiej przyszłości:

- wzrost zależności elastyczności produkcji od elastyczności systemów informatycznych,
- wzrost złożoności narzędzi hardware'owych i software'owych oraz związanych z nimi metod modelowania,
- wzrost skali komputeryzacji przedsiębiorstwa,
- wzrost znaczenia kluczowych technologii informatycznych w praktyce przemysłowej.

Kompleksowość współczesnych systemów informatyki gospodarczej wymaga zastosowania równie kompleksowych metod dla ich projektowania, wdrażania i eksploatacji. Dotychczasowa metodologia w tej dziedzinie jest niewystarczająca, co wynika bezpośrednio z jej negatywnych właściwości:

- przesadne dążenie do wąsko pojętej algorytmizacji postępowania, co ogranicza elastyczność metody;
- jednostronne ujmowanie rzeczywistości składającej się z różnorodnych obiektów, co implikuje konieczność posługiwania się różnorodnymi metodami;
- tworzenie zamkniętych, indywidualnych rozwiązań, w niewielkim stopniu korzystających z istniejących standardów, zarówno normowanych jak i de facto;
- wycinkowość podejścia, bez uwzględniania wszechzwiązku zjawisk i interdyscyplinarności.

Do istotnych wniosków w rozważanym obszarze należy zaliczyć następujące.

1. Koezystencyjne modelowanie systemów informatycznych ESP, mające charakter heterogeniczny, gwarantuje stabilność rozwiązania i zapewnia mu perspektywę rozwojową.
2. Zastosowanie otwartych systemów informatycznych podnosi ich elastyczność i pozytywnie wpływa na stopień integracji systemu informacyjnego przedsiębiorstwa.
3. Pozatechniczne aspekty procesu projektowania mają istotny wpływ na powodzenie wdrożenia w praktyce.
4. Pomiar efektywności technologii informacyjnej jest trudny i wymaga stosowania miar pozaekonomicznych.
5. Możliwe jest przesuwanie znacznej części zadań związanych z zarządzaniem zasobami informacyjnymi od działu IT do użytkowników, co podnosi efektywność systemu, a zwłaszcza jego elastyczność.

Zaproponowane w pracy rozwiązania nie wyczerpują bardzo rozbudowanej, poruszonej tu problematyki. Badania w tym zakresie będą nadal prowadzone i zakłada się, że będą one przebiegać w następujących kierunkach:

- 1) możliwości stosowania systemów obiektowych w praktyce przemysłowej,

- 2) technologii multimedialnych i technologii pracy grupowej w lokalnym i globalnym środowisku sieciowym,
- 3) rozproszonego i równoległego zarządzania zasobami informacyjnymi przedsiębiorstwa w różnych wariantach architektur informatycznych z uwzględnieniem metabaz danych,
- 4) perspektywy stosowania metod sztucznej inteligencji (systemów ekspertowych, sieci neuronowych) w ESP,
- 5) pogłębienia znajomości pozatechnicznych aspektów projektów informatycznych i dalszego poszukiwania metod pomiaru ich efektywności.

Propozycje dotyczące zastosowań technologii informatycznych w ISP zostały opisane w pracy [4: 1, rozdz. 10]. W rozdziale tym pokazano trendy informatyki gospodarczej mające istotne znaczenie dla zaawansowanych systemów produkcji. Za punkt wyjścia przyjęto charakterystykę warstwy sprzętowej, będącej fizyczną podstawą implementacji inteligentnych systemów produkcyjnych, omówionych w następnym rozdziale; w tej sferze umieszczono komputery z ich elementami składowymi, a także sieci teleinformatyczne. Przedstawiono również oprogramowanie systemowe i narzędziowe, uwzględniając paradygmaty inżynierii programowej. Następnie analizie poddano oprogramowanie użytkowe z uwzględnieniem fenomenu ekonomii sieciowej.

Kierunki rozwoju inteligentnych systemów produkcyjnych

4.1. Wprowadzenie

Prawdopodobieństwo utrzymania się współczesnego przedsiębiorstwa na rynku w dużym stopniu zależy od poziomu realizowanej w nim strategii konkurencyjności. Jednym ze środków to upowszechnienie nowych form elastycznych systemów produkcji. „Organizacje przyszłości powinny zapewnić symultaniczne i skoordynowane zmiany we wszystkich obszarach swej działalności gdyż drobne nawet zakłócenia w jednym z nich zagrażają funkcjonowaniu całego systemu” [1 : 7]. Wobec tego transformacja „organizacji teraźniejszości” w „organizacje przyszłości” jest procesem, który ma zharmonizować działania zmierzające do ożywienia i odnowy współczesnych przedsiębiorstw.

Modele, które będą przedmiotem implementacji organizacji przyszłości to przede wszystkim: organizacje uczące się, wirtualne, sieciowe, bioniczne, fraktalne, holograficzne, holoniczne [1: 7].

Perspektywiczna organizacja powinna być:

- wyspecjalizowana,
- wykorzystująca możliwości,
- nowatorska,
- heterarchiczna.

Podstawowymi problemami, wobec których stają menedżerowie takich organizacji, są [4]:

- **uczenie się dostosowania** – jak organizacja może efektywnie radzić sobie z ciągłymi wielowymiarowymi zmianami? Jak spotęgować umiejętności uczenia się i dostosowywania?
- **struktura** – w jaki sposób przedsiębiorstwo winno być zorganizowane, aby szybko reagować na zmiany rynków? Jakie powinny być relacje z siecią klientów?
- **umiejętności** – jakie cechy przywódcze są niezbędne dla kierownictwa organizacji przyszłości?
- **wpływ technologii informacyjnych** – co stanie się ze strukturami przemysłowymi po wprowadzeniu rynków elektronicznych?
- **nowe metody pracy** – jak wyglądać będzie praca w zespołach? Jak będzie oceniana?
- **innowacje** – w jaki sposób organizacje mają tworzyć środowisko generujące nieustanne innowacje?
- **środki osiągnięcia sukcesu** – czy umiemy zaadaptować tradycyjne instrumenty księgowo-dla celów lepszego przedstawiania prawdziwych zasobów długów i długoterminowych perspektyw rozwoju?

Wobec olbrzymiej skali różnorodnych czynników wpływających na rozwój przyszłej organizacji przedsiębiorstw wydaje się, że nie można mówić o jakimś wzorcowym modelu idealnej organizacji. Istnieje i istnieć będzie wiele zróżnicowanych przedsiębiorstw przyjmujących formy i sposoby funkcjonowania w zależności od specyficznych celów, warunków i typów działalności, środowiska społecznego i kultury wewnętrznej. Opis ogólny wymienionych wyżej modeli i problemów zawarto w pracach [5], [1: 7], [1: 8].

Podstawowym obszarem działalności przedsiębiorstw są procesy produkcyjne. Większą konkurencyjność zyskują te przedsiębiorstwa, które potrafią implementować innowacyjne techniki wytwarzania wykorzystując istniejącą infrastrukturę i tradycyjne rozbudowane rynki. Takie podejście jest cechą intensywnej fazy globalizacji gospodarczej, która zdominuje obecną (ekstensywną) w ciągu najbliższej dekady. W związku z tym podejmowane są próby tworzenia nowych form organizacji produkcji zgodnie z ewolucyjnym postępem w zakresie zautomatyzowanych systemów wytwarzania – aż do SAGW (samoregulujące się automatyczne gniazda wytwórcze) i SASW (samoprzekształcające się automatyczne systemy wytwórcze), co przedstawiono w pracach [1: 7, 8].

W pracy [8] obszernie omówiono metodykę projektowania ESSP. W szczególności, w uwagach końcowych, nakreślono prognozę dalszych prac badawczo-rozwojowych w przedmiotowym obszarze. Praktyka ostatnich lat w pełni potwierdza trafność sformułowanych wniosków. Elastyczność systemów produkcyjnych, w tradycyjnym ujęciu, rozumiana głównie sprzętowo (maszynowo), poprzez technologie „C” (CAD, CAM, CAQ, CAP i in.) osiągnęła stopień zintegrowany CIM. Niezwykle istotnym czynnikiem integrującym okazała się tu informacja. Podlega ona w mniejszym stopniu ograniczeniom fizycznym, charakterystycznym dla innych form szeroko rozumianej materii, takich jak energia czy przepływy materiałowe. Predestynuje to informację i jej przetwarzanie do roli podstawowego czynnika transformacji ESSP, umożliwiającego dalsze zwiększanie elastyczności tych systemów. Można zatem stwierdzić, że nowoczesnie rozumiana elastyczność ESSP jest w znacznej mierze elastycznością informacyjną.

Kolejną fazą rozwoju ESSP/CIM, której pojawienie się przewidziano w cytowanej pracy na aktualną dekadę, są samoprzekształcające się automatyczne systemy wytwórcze SASW. Samoprzekształcalność (samomodyfikowalność) jest najwyższym poziomem elastyczności i cechuje systemy samouczące się, czyli inteligentne. Zatem ideałem SASW są inteligentne systemy produkcyjne ISP (ang. *Intelligent Production Systems*) [5].

4.2. Inteligentne systemy produkcyjne

Dyskusja na temat definicji: inteligencji, sztucznej inteligencji czy ISP względnie jego podsystemu wytwórczego IMS (ang. *Intelligent Manufacturing System*), wykraczałaby poza ramy tej pracy, pozostającej w świecie inżynierii, a więc ukierunkowanej utylitarnie. Jako punkt wyjścia przyjmijmy definicję sztucznej inteligencji, wzorowaną na klasyku tej dziedziny – Marvinie Minskym, zaproponowaną przez M. J. Kasperskiego [5]: „Sztuczna inteligencja jest dziedziną wiedzy, która postawiła sobie za cel i przedmiot badań maszyny, które potrafiłyby rozwiązywać zadania, przy rozwiązywaniu których człowiek korzysta ze swojej inteligencji. Zadaniem takimi mogą być na przykład rozumowanie czy podejmowanie decyzji”.

Z kolei Seweryn Chajtman [4] w dekompozycji systemu gospodarczo-produkcyjnego szczególnie rolę przypisuje procesom info-sterującym, widząc w nich szczególnie typ proce-

sów ergotransformacyjnych (sterowanych przez człowieka) i definiując „zarządzanie” jako zespół tych procesów. Na tej podstawie możemy stwierdzić, że ISP jest systemem, w którym w znacznym stopniu ergotransformacyjność zostaje zastąpiona maszynowym przetwarzaniem danych, wykorzystującym informatyczne technologie sztucznej inteligencji. Cechę tą pokażemy na przykładzie głównych typów ISP, jakimi są:

- holonowe systemy produkcyjne HMS (ang. *Holonic Manufacturing System*) [11],
- bioniczne systemy produkcyjne BMS (ang. *Bionic Manufacturing System*) [12].

4.2.1. Holonowe systemy produkcyjne

Pojęcie samej „idei holonistycznej” pochodzi od węgierskiego filozofa A. Koestlera, który zaproponował ją w latach 70. ubiegłego wieku, w kontekście filozoficznym, dla modelowania rozwoju systemów biologicznych czy socjologicznych [6]. Badacz ów pierwszy zaproponował użycie pojęcia *holon* jako złożenia greckich słów *holos* (całość) i *on* (część). W latach 90. można było natomiast zaobserwować rozwój pojęcia HMS w związku z pierwszymi eksperymentami w tej dziedzinie w przemyśle japońskim (Hitachi, Toshiba) [11].

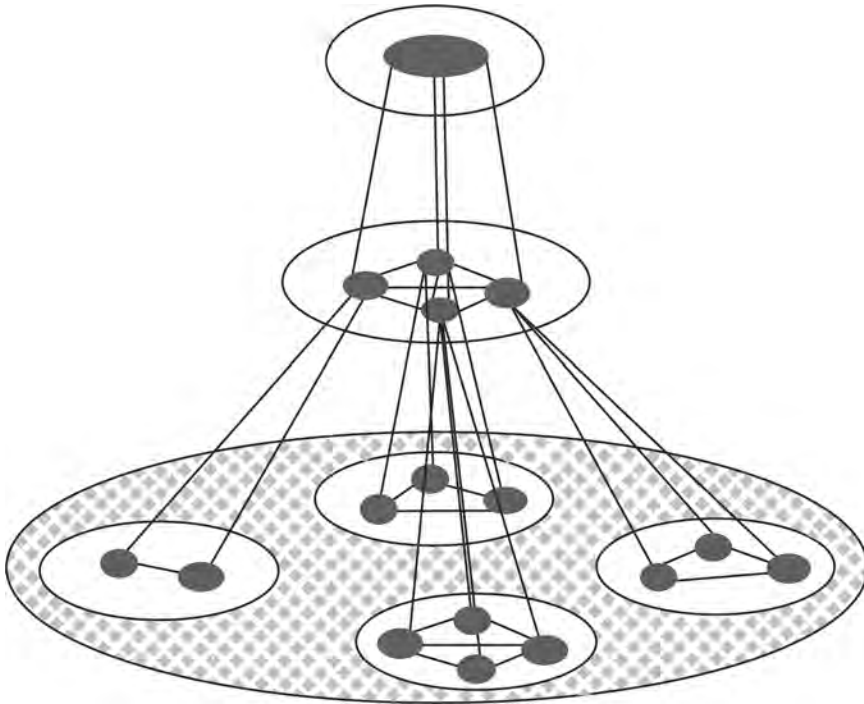
Geneza HMS wiąże się ze słabością klasycznych systemów CIM/FMS, których paradygmatyczna elastyczność sprzętowa ograniczona jest przez hierarchiczność ich scentralizowanego systemu informacyjnego. W kontekście produkcyjnym możemy zdefiniować HMS jako holarchiczny system wytwórczy złożony z holonów. Sam holon to autonomiczny i kooperatywny moduł odpowiedzialny za przetwarzanie obiektów fizycznych oraz skojarzonych z nimi informacji w ramach określonych operacji produkcyjnych. Z kolei holarchia to dynamiczna hierarchia kooperujących holonów, celowo i czasowo agregująca i ograniczająca ich autonomiczność, zgodnie ze zdefiniowanymi zadaniami produkcyjnymi. Organizację holoniczną przedstawiono na rys. 4.1.

Do programowej implementacji HMS dobrze nadają się systemy multiagentowe MAS. W tym miejscu należy postawić pytanie o bardziej szczegółowe związki między MAS a HMS. W obu przypadkach mamy bowiem do czynienia ze strategiami, których podstawą są inteligentne obiekty kooperujące ze sobą dla osiągnięcia zadanych celów z uwzględnieniem ich dynamiki, jak również zmiennego otoczenia. Niemniej technologie agentowe są konstrukcją przede wszystkim programową, choć oczywiście efekty ich działań są przyporządkowane obiektom ze świata rzeczywistego. Z kolei holony HMS to jednostki integrujące bezpośrednio świat fizyczny i informacyjny, czyli realny i wirtualny. Holon obejmuje również mechanikę samego procesu wytwórczego i można wyróżnić w nim trzy warstwy:

- warstwę fizyczną,
- warstwę sterującą,
- warstwę interfejsu.

Pierwsza z nich integruje w holonie właściwe operacje produkcyjne, np. frezowanie. Powiązana jest ona z warstwą sterującą – ta właśnie część może być traktowana jako wspólna dla systemów MAS i HMS. W warstwie interfejsu możemy z kolei wyróżnić trzy elementy:

- interfejs warstwy fizycznej,
- interfejs człowiek-maszyna,
- interfejs międzyholonowy.

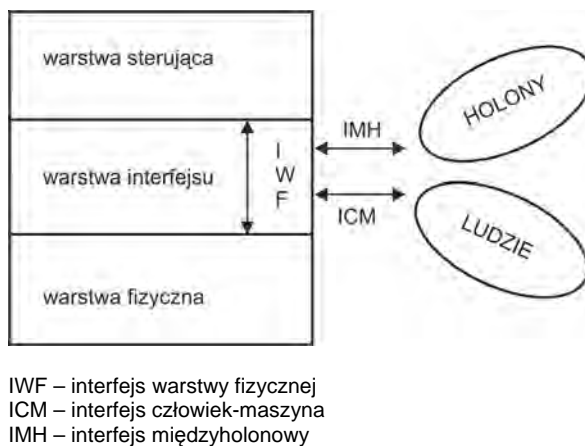


Rys. 4.1. Organizacja holoniczna (źródło: Adam E., Kolski C., Mandiau R., Vergison E.: Holonic User Driven Methodologies and Tools for Simulating Human Organizations, www.perso.wanadoo.fr.)

Pierwszy z nich łączy warstwę sterującą holonu z jego warstwą fizyczną, drugi jest złączem umożliwiającym komunikację człowieka z holonem, a trzeci zapewnia komunikację interholonową w ramach holarchii. Schemat ilustruje rys. 4.2.

Tak więc wyspecyfikowana maszyna systemu wytwórczego może być interpretowana przez holon przyporządkowujący zadania, jako holon stanowiskowy (maszyny). W rzeczywistości ów drugi jest złożeniem dwóch odrębnych holonów: holonu przydziału zasobów i holonu sterującego. Te dwa holony odpowiedzialne są za przydział zasobów fizycznych do wykonania zadania oraz za przesyłanie impulsów sterujących czyli w obu przypadkach ich partnerem jest odrębny holon zasobów. W tym przykładzie, w zależności od przyjętego poziomu abstrakcji modelowania, mamy do czynienia z trój- bądź pięcioholonową holarchią.

Przechodzenie systemów FMS/CIM do HMS, w kontekście struktury holonu, nieodparcie nasuwa skojarzenia z transformacją systemów programowych, jaką obserwujemy w ostatnich latach: od programowania strukturalnego do obiektowego (w rzeczywistości proces ten trwa dziesięciolecia, zważywszy występowanie mechanizmów charakterystycznych dla języków obiektowych już w SIMULI, w latach 60.). Holon integruje fizyczny i informacyjny wymiar systemu wytwórczego, podobnie jak obiekt programowy znosi tradycyjne podziały wynikające z klasycznej, wirthowskiej formuły: program = algorytm + dane.



Rys. 4.2. Podstawowe składniki holonu

Oczywiście z samym holonem skojarzony jest zarówno określony algorytm, jak i struktury danych, można tu wręcz mówić o bazie danych holonu. A zatem także i w zakresie bazodanowym znajdziemy stosowne technologie, których specyfika dobrze odpowiada charakterystykom holonów. Na poziomie multiholonowym taką technologią mogą być relacyjne bazy danych, jako opozycja do wcześniejszych rozwiązań hierarchiczno-sieciowych, odpowiadających sztywnym i scentralizowanym systemom produkcyjnym. Jak wiadomo, w relacyjnych bazach danych ścieżki dostępu do danych tworzone są (z punktu widzenia użytkownika) *ad hoc*, tj. w zależności od programu (*query*) zapytania zgłoszonego w określonym momencie. Również i w systemie holonowym nie można wyróżnić stanu typowego (normalnego), ponieważ stan zasobów czy plan procesu może ulec zmianie w dowolnej chwili w zależności od złożenia strategicznych kryteriów wyznaczających rozwiązania alternatywne (np. koszt, jakość, czas).

4.2.2. Bioniczne systemy produkcyjne

Poszukiwanie naturalnych wzorców dla rozwiązań technicznych jest aktualnym trendem. Klasycznym już przykładem w tym obszarze są algorytmy genetyczne i ich zastosowania jako jedna z głównych metod sztucznej inteligencji. W tym nurcie mieszczą się także systemy BMS, poszukujące związków między żywymi organizmami a systemami produkcyjnymi. Nadmienimy jedynie, że pełna realizacja tej idei miałaby także wymiar ekologiczny: bioniczne fabryki stałyby się częścią światowego ekosystemu na podobieństwo żywych organizmów. Bowiem wszystko w świecie przyrodniczym, co wytwarza człowiek (żywy organizm), a także on sam po zakończeniu życia, jest nieszkodliwe dla środowiska. Rozważanie te wykraczają wszakże poza ramy niniejszego rozdziału i dotyczą dalszych faz rozwoju BMS.

Obecna, początkowa faza BMS, dotyczy przede wszystkim poszukiwań wzrostu efektywności ESP na bazie mechanizmów biologicznych, które gwarantują, że organizm żywy potrafi być elastyczny, zarówno w bieżącym wymiarze operatywnym jak i strategicznie (ewolucja gatunków). Oznacza to autonomiczność systemu wyrażającą się w jego podstawowych cechach (tab. 4.1) (w nawiasie przykłady transformacji znaczeniowych w kategoriach produkcyjnych):

- samorozpoznawanie (wzajemna identyfikacja elementów i procesów systemu, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych),
- samodopasowywanie (elastyczność reakcji, w szczególności podczas zakłóceń),
- samoodtwarzanie (naprawy i wymiana zużytych elementów),
- samoorganizacja (marketing, planowanie, przetwarzanie zleceń, organizacja produkcji, logistyka zaopatrzeniowa i dostawcza, sprzedaż i obsługa klientów, finanse, analizy gospodarcze),
- samowzrost (realizacja założeń budżetowych i ciągła poprawa wskaźników ekonomicznych),
- samoewolucja (nowe produkty i formy ich produkcji, ekspansja rynkowa).

Owe cechy podstawowe składają się na 3 metacechy BMS:

- biorarchia,
- genetyczna reprezentacja informacji (GRI),
- zdolność uczenia się.

Biorarchia (*bionic hierarchy* – hierarchia bioniczna) oznacza rozproszone struktury cechujące się znacznym stopniem odpowiedzialności lokalnej i agregowane poziomami aż do najwyższego (np. w organizmie człowieka – mózg). Biorarchia jest bardziej efektywna i elastyczna niż tradycyjne, scentralizowane hierarchie. Genetyczna reprezentacja informacji gwarantuje zdolność jej dziedziczenia. Oczywiście proste formy takiej zdolności znajdziemy już w klasycznych rozwinięciach listy części wyrobu BOM (ang. *Bill Of Materials*), aczkolwiek ważna jest tu także ich reprezentacja programowa.

Jak wiadomo w, ciągle popularnych, relacyjnych systemach bazodanowych tabelarycznie grupowane rekordy przetwarzane są proceduralnie. W istocie, oznacza to większą elastyczność w porównaniu ze sztywnymi schematami hierarchiczno-sieciowymi, z uwagi na powiązania między obiektami tworzone *ad hoc*, podczas wykonywania się programu. Niemniej programowanie obiektowe z definicji hermetyzuje procedury i koncentrując się na samych związkach między obiektami czyni z dziedziczenia swój paradygmat projektowy.

W żywym organizmie wadliwy ciąg nukleotydów prowadzi do wadliwych genów, a w konsekwencji do wadliwych protein, a więc choroby czy śmierci. W sferze BMS, przetwarzającego genetyczne informacje produkcyjne, analogia jest oczywista: wadliwy ciąg bitów prowadzi do wadliwego oprogramowania przetwarzającego wadliwe dane i w konsekwencji do strat produkcyjnych. Zakłada się jednak, że naturalne wzorce genetyczne dają większe gwarancje elastycznej niezawodności niż oprogramowanie tradycyjne.

Ostatnia metacecha BMS ma ciągle, w znacznym stopniu, charakter postulatywny. Warunkiem dla istnienia oprogramowania samouczącego się jest jego samomodyfikowalność, tymczasem cecha ta występuje jedynie w bardzo wąskim rozumieniu tego terminu. Warto zauważyć, że pojawienia się samouczącego algorytmu produkcyjnego należy oczekiwać raczej nie na drodze tworzenia rozbudowanych, zamkniętych systemów o charakterze wyspowym (*stand alone*), ale w efekcie wzrostu złożoności dynamicznych systemów, składających się z dużych zbiorów, stosunkowo prostych, reagujących ze sobą autonomicznych modułów (agentów). Takie podejście koresponduje również z genetycznym paradygmatem funkcjonowania systemów: zaledwie czteroliterowy alfabet nukleotydów DNA jest podstawą dla 20-literowego alfabetu aminokwasów tworzących zbiór genów, wprowadzie znacznie większy, bo liczony już w tysiącach, niemniej bardzo ograniczony, zważywszy różnorodność otaczających nas form organizmów z bogactwem człowieczeństwa włącznie.

Parafrazując definicję klasyka metodologii programowania, Niklausa Wirtha:

algorytmy + struktury danych = programy,

można powiedzieć, że

BMS = biorarchia + GRI.

Aby korzystać z doświadczeń natury, należy wyspecyfikować relacje między system żywym a wytwórczym dla zdefiniowania biorarchii. W systemie żywym jej odpowiednikiem jest 5 podstawowych poziomów: komórka, tkanka, organ, układ, organizm. Przykłady jej odpowiedników wytwórczych przedstawiono w tab. 4.1.

Tabela 4.1

Hierarchia biologiczna i bioniczna

System żywy	BMS
komórka (najmniejsza, zorganizowana jednostka żywej materii)	podstawowa jednostka produkcyjna, np. elastyczny moduł produkcyjny (robot, obrabiarka, magazyny części i narzędzi, sterowanie lokalne)
różne rodzaje komórek (różnice w aktywacji tej samej informacji genetycznej w ramach organizmu)	różne rodzaje komórek produkcyjnych, korzystające z różnych fragmentów tego samego systemu informacyjnego przedsiębiorstwa
czynności życiowe komórki, strumienie chemiczno-elektryczne (enzymy, hormony)	operacje produkcyjne, przepływy materiałowo-energetyczno-informacyjne (koordynacja, sterowanie)
tkanka (zespoły komórek o podobnej budowie i pochodzeniu, wspólnie spełniających określoną funkcję)	zespół podstawowych jednostek produkcyjnych, np. elastyczne gniazdo produkcyjne dla rodziny technologicznej części wyrobów (roboty, centra obróbcze)
organ/narząd (wyodrębnione morfologicznie zespoły tkanek spełniające złożone funkcje organizmu)	wyodrębnione organizacyjnie zespoły gniazd i modułów np. elastyczna linia wytwórcza wytwarzająca podzespoły czy wyroby gotowe
układ (zespół współpracujących narządów wykonujących najbardziej istotne funkcje organizmu, np. oddychanie, trawienie)	elastyczne wydziały czy zakłady spełniające fundamentalne funkcje produkcyjne, np. gospodarka transportowa czy magazynowa, podsystem wytwórczy czy inne podsystemy
organizm	przedsiębiorstwo jako BMS
społeczeństwo	partnersko konkurujące przedsiębiorstwa

Należy wyraźnie podkreślić, że trzeba traktować je wyłącznie jako strategiczny punkt wyjścia do definiowania bardziej szczegółowych zależności w rozważanym obszarze, z uwagi na jego złożoność, zarówno w sferze biologicznej, jak i produkcyjnej.

4.3. Technologie agentowe

Jak wykazano wcześniej, podwyższenie elastyczności procesu produkcyjnego można osiągnąć, zwiększając jego elastyczność informacyjną. Jednocześnie, poziom jej złożoności winien dorównywać poziomowi złożoności sterowanego adaptacyjnie procesu produkcyjnego. W ewolucyjnym rozwoju informatyki od przetwarzania danych poprzez przetwarzanie informacji aż do przetwarzania wiedzy rysuje się perspektywa pojawienia się kolejnego członu: przetwarzania inteligencji. Przetwarzanie takie możliwe jest za pomocą dynamicznych metod sztucznej inteligencji. Do takich należą systemy multiagentowe (ang. *Multi-Agent-Systems*) – MAS, znajdujące zastosowanie w sterowaniu produkcją.

Niezależnie od wielości definicji (kontekstowych) agentów programowych można przy tym wyspecyfikować szereg cech takiego oprogramowania, mających często charakter postulatyczny [10]:

- autonomiczność (funkcjonowanie bez interwencji człowieka),
- mobilność (przenoszenie kodu i stanu w obrębie sieci komputerowej),
- długoterminowość (działanie przez długi czas, np. wiele miesięcy),
- komunikacyjność (komunikowanie się z innymi agentami i otoczeniem),
- kolaboratywność (współpraca z innymi agentami),
- elastyczność (dynamiczne zmiany strategii rozwiązywania zadań),
- adaptacyjność (samomodyfikowanie się, np. zmiany w środowisku programowym),
- racjonalność (samoświadoma efektywność osiągania celów),
- wiarygodność (gwarancja zaufania i bezpieczeństwa dla użytkownika),
- personalizacja (dopasowywanie się do indywidualnych potrzeb użytkownika),
- orientacja celowa (tłumaczenie wysokoabstrakcyjnych celów na operacje szczegółowe),
- produktywność (automatyczne inicjowanie działalności bez wiedzy użytkownika),
- predykcyjność (przewidywanie przyszłych skutków podejmowanej akcji).

Od początku ubiegłej dekady obserwujemy postępującą, paninformatyczną dyfuzyjność technologii agentowych. Prowadzi to m.in. do integrowania na tej bazie systemów MAS i metod rozproszonego rozwiązywania zadań DPS (ang. *Distributed Problem Solving*). Trudno wyobrazić sobie obszar informatyki, w którym technologie agentowe nie miałyby znaczenia. Symptomatyczna jest ich mnogość w naturalnym środowisku agentowym, jakim jest otwarta sieć internetowa. Już choćby usługowe portale internetowe korzystają z wielu rodzajów agentów. Są wśród nich infoboty (agent informacyjny przeszukujący zasoby Sieci dla uzyskania wiedzy pożądanej przez użytkownika), agenci handlowi (*trader agent*) dokonujący transakcji finansowych, awatary reprezentujące optycznie użytkownika na forum dyskusyjnym (*chat*) czy softboty indywidualnie konfiguruje banery reklamowe.

Wśród klasycznych już agentowych systemów rozproszonego rozwiązywania problemów znajduje się ARCHON stosowany w zarządzaniu przepływem energii elektrycznej w Hiszpanii. W kontekście katastrof lotniczych, spowodowanych błędami naziemnej kontroli lotu, znaczenia nabiera system OASIS stosowany na lotnisku w Sydney. Każdy samolot wkraczający w przestrzeń powietrzną lotniska reprezentowany jest przez softwarowego agenta posiadającego określony cel (np. lądowanie na określonym pasie i w wyznaczonym czasie). Powszechne stosowanie takiej technologii pozwoliłoby na przejście lotnictwa od

sztynych korytarzy powietrznych do bezpieczniejszych regulacji typu *free flight* (korytarze wirtualne tworzone ad hoc).

Obok zastosowań medycznych, wojskowych czy rozrywkowych istnieją także projekty o znaczeniu biznesowym. Takowym jest ADEPT testowany przez British Telecom. W tym systemie organizacja przedsiębiorstwa odwzorowywana jest jako zbiór agentów, które obsługują proces biznesowy poprzez świadczenie usług i wzajemne negocjacje. Mamy tu zatem do czynienia z kolejnym poziomem przechodzenia od zarządzania funkcjonalnego do zarządzania procesowego, a przy tym termin „zarządzanie przez cele” nabiera nowego znaczenia, mówimy bowiem o celach formułowanych dla agentów.

Takie podejście znajdujemy także w wieloagentowym systemie YAMS (ang. *Yet Another Manufacturing System*) [7] przeznaczonym specjalnie dla zarządzania elastycznym wytwarzaniem FMS opartym na komórkach wytwórczych i innych elementach struktury produkcyjnej, aż do przedsiębiorstwa jako całości włącznie, gdzie każdy element jest reprezentowany przez agenta. Głównym celem systemu jest efektywne zarządzanie elastyczną produkcją wykorzystujące mechanizmy negocjacji interagentowych i rozproszone rozwiązywanie zadań.

4.3.1. Projekt HTS

Literatura podaje opisy różnorodnych modeli systemów HMS [2]; na szczególną uwagę zasługują wszakże doniesienia związane z praktyką wdrożeń przemysłowych. Do takowych należy studium referencyjne rozproszonego sterowania dla holonowego przepływu materiałów w zorientowanym warsztatowo systemie wytwórczym, na bazie autonomicznego systemu transportowego zaprezentowane w pracy [11]. Projekt dotyczy holonowego systemu transportowego HTS obejmującego zespół autonomicznych pojazdów transportowych APT (dla większej przejrzystości używamy skrótów w polskich tłumaczeniach dla pojęć niemających znaczenia uniwersalnego, a jedynie występujących w związku ze specyfiką projektu).

W podstawowej fazie projektu wyróżniono 3 jednostki ATP i trzy obrabiarki tj. frezarkę 3-osiową, frezarkę 5-osiową i pralnicę. Ponadto istnieją następujące komponenty:

- automatyczny magazyn wysokiego składowania jako magazyn wejściowy,
- międzymagazyn wyjściowy.

Zadaniem systemu wytwórczego jest okrawanie odlewów silników V6 w fazie podstawowej, a także obróbka wałów korbowych w fazie rozwojowej.

Przepływ materiałowy realizowany jest za pomocą 3 autonomicznych pojazdów ATP. Pojazdy te nie są powiązane żadnym centralnym sterowaniem, a jednocześnie, z uwagi na identyczną budowę, mogą być traktowane modułowo. Te cechy upoważniają do traktowania prezentowanego systemu jako holonowego systemu transportowego HTS, aczkolwiek jego fizyczna elastyczność ma swoje ograniczenia – w szczególności specyfika środka transportowego powoduje, że podczas jednej jazdy można każdorazowo transportować tylko jedną część obróbczą. Z kolei w fazie rozwojowej systemu, dla zwiększenia jego elastyczności, zdublowano 3 obrabiarki, zwiększając ich liczbę do sześciu, co umożliwia definiowanie alternatywnych dróg przepływu materiałowego – liczbę ATP również podwojono. Jednocześnie wprowadzono stację załadowniczą i wydzielony obszar parkingowy dla pojazdów nieaktywnych.

Celem systemu jest osiągnięcie maksymalnej przepustowości przy zachowaniu uproszczonej konfigurowalności, co wiąże się ze specyfikacją systemów sterowania dla

modułów obrabiarek, ATP oraz magazynów we/wy, a także samego HTS (stacja załadownicza i obszar parkingowy nie mają odrębnego sterowania). Sam system wytwarzania jest włączony do całości systemu produkcyjnego, składającego się z dalszych systemów wytwórczych. Ów zewnętrzny system produkcyjny gwarantuje, że miejsca składowania w obszarze magazynowym są odpowiednio zapełnione, tzn. w każdej chwili jest do dyspozycji co najmniej jedna część obróbcza. Moduł magazynowy posiada informacje z nadrzędnego systemu produkcyjnego o dziennych ilościach przewidzianych do produkcji – po jej osiągnięciu rozważany system wytwórczy automatycznie przerywa swoją działalność.

W fazie podstawowej zagwarantowano bezawaryjną pracę obrabiarek, natomiast dopuszczono możliwość awarii ATP, w fazie rozwojowej zwiększono zakres dopuszczalnych awarii, także w obszarze obrabiarek, w szczególności wskutek złamania się narzędzia obróbczego. Wkomponowanie systemu wytwórczego w całość systemu produkcyjnego wymaga dopuszczenia możliwości produkcji różnorodnych części, a co za tym idzie, wprowadzania zmian w zakresie obrabiarek i pojazdów transportowych. Dla ich zagwarantowania składowe moduły systemu wytwórczego wyposażono w zdecentralizowane sterowanie (software). Jednocześnie dla koordynacji działań poszczególnych modułów wyposażono je w zdolność wzajemnej komunikacji drogą bezprzewodową, przy czym w fazie rozwojowej dopuszczono także możliwość występowania zakłóceń podczas transmisji danych.

Jako główne zadania systemu wyznaczono:

- wyspecyfikowaną obróbkę części wedle specyfikacji produkcyjnej,
- unikanie, względnie likwidację sytuacji zapętlenia (*deadlock*),
- realizację zadań transportowych i szeregowanie operacji,
- unikanie kolizji między ATP.

Dla obrabiarek systemu krytyczne znaczenie mają bufony wejściowe i wyjściowe, w związku z tym wysyłają one swój stan do układu sterowniczego po każdej operacji.

Z uwagi na całkowitą autonomiczność, najbardziej holonowymi modułami systemu są jednostki ATP. Pojazdy wyposażone są w robota służącego do za- i wyładunku transportowanych części oraz sensory służące do lokalizacji przeszkód na drodze pojazdu. Maksymalna prędkość pojazdu jest porównywalna z prędkością pieszego i wynosi 1,5 m/s tj. ok. 5 km/h. W fazie hamowania bądź przyspieszania ustalono prędkość na ok. 0,7 m/s². Pojazdy mają zdolność do automatycznego przełączania się na tryb energooszczędny. W tym trybie nie są one zdolne od bezpośredniej pracy, a jedynie podzespoły komunikacyjne zachowują możliwość wymiany informacji z otoczeniem.

Centralne znaczenie dla ATP ma ich produkcyjna baza danych. Informacje w niej zawarte są znane każdej jednostce ATP. W szczególności w bazie znajdują się dane dotyczące przepływu materiałów oraz stanu każdej z obrabiarek, włącznie z ich lokalizacją. Po uruchomieniu systemu wytwórczego jeden z pojazdów przejmuje rolę koordynatora i podejmuje bądź deleguje zadania. Rola ta nie narusza autonomii żadnego z pojazdów i przydzielana jest różnym z nich, w zależności od sytuacji.

Wyniki uzyskane podczas wdrożenia projektu potwierdzają efektywność idei elastyczności realizowaną za pomocą holonowych systemów wytwórczych. W rozważanym systemie oszacowana ilość sytuacji krytycznych, związanych ze zmianami rytmu produkcji, nie przekraczała 10%, podczas gdy w analogicznym systemie nieholonowym sięgała 25%. Autorzy projektu w dalszej fazie zamierzają rozbudować jego funkcje kontrolno-sterujące o interfejsy animacji i symulacji 3D przeznaczone dla człowieka.

4.4. Podsumowanie

Formy organizacji elastycznej produkcji ewoluują w kierunku autonomicznym i samouczącym się, przy czym ta druga cecha ma jeszcze charakter postulatyczny i wiąże się z aktualnym stopniem zaawansowania metod sztucznej inteligencji. Również w obszarze produkcyjnym, przez analogię, możemy wyróżnić elastyczność miękką (*weak*) i twardą (*hard*). Systemy HMS sytuują się w pierwszym z tych obszarów, z uwagi na ich ograniczenia fizyczne. Paradoksalnie wiąże się to z ich większym zaawansowaniem praktycznym w stosunku do drugiej grupy, w której można wyróżnić systemy BMS, traktujące system wytwórczy ewolucyjnie i samoorganizacyjnie, oraz systemy FMS (ang. *Fractal Manufacturing System*), które doszukują się w fabryce wzorów rekurencyjnych.

Systemy BMS, HMS oraz fraktalne cechuje autonomiczność i elastyczność wzorowana na systemach naturalnych. Cechą BMS i HMS są specyficzne struktury hierarchiczne: biorarchia i holarchia, przy czym pierwsza z nich odpowiada organizmom żywym, druga zaś jest definiowana niezależnie od nich i może mieć bardziej płaski charakter. Fabryka fraktalna koncentruje się na samopodobieństwie, jako podstawowej cesze przyrodniczej, z czego nie muszą wynikać bezpośrednie konsekwencje dla wytwarzania na poziomie operacyjnym: fraktal ma także znaczenie pozatechnologiczne i opisuje środowisko otaczające przedsiębiorstwo (finansowe, społeczne).

Silną stroną BMS jest bardzo precyzyjna definicja ich odpowiedników naturalnych, niemniej niewolnicze poszukiwanie bionicznych analogii może prowadzić do ograniczeń elastyczności projektowej. Stąd obiecującym podejściem dla tworzenia IPS wydaje się rozszerzanie modelu HMS o cechy BMS, tak aby holarchii nadawać dynamiczne cechy samorozwojowe. Idea fraktalności produkcyjnej ma charakter bardziej teoretyczny, co nie umniejsza znaczenia takiego podejścia, wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z samopowtarzalnością.

BIBLIOGRAFIA

Rozdział 1

- [1] Afentakis P.: A model for layout design in FMS. W: Flexible Manufacturing systems: Methods and studies. (Ed. A. Kusiak). North-Holland: Elsevier Sc. Publ. 1986, s. 127–139.
- [2] Asimow M.: Wprowadzenie do projektowania w technice. Warszawa: WNT 1967.
- [3] Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych. (Red. H. Kowalowski). Warszawa: WNT 1984.
- [4] Bałtowski M.: Sterowanie produkcją w systemie „akurat na czas”. W: (Materiały) Konferencja „Systemy produkcyjne – teoretyczne i praktyczne problemy projektowania”. Warszawa: Politechnika Warszawska 1987, s. 338–344.
- [5] Banachowski L., Diks K., Rytter W.: Algorytmy i struktury danych. Warszawa: WNT 1996.
- [6] Bazewicz M.: Wielodostępne systemy informatyczne. Warszawa: PWN 1977.
- [7] Brzeziński M. (red.): Organizacja i sterowanie produkcją. Warszawa: Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Placet 2002.
- [8] Banaszek Z., Muszyński W.: Systemy elastycznej automatyzacji dyskretnych procesów produkcyjnych. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1991.
- [9] Coad P., Yourdon E.: Analiza obiektowa. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Read Me 1994.
- [10] Coad P., Yourdon E.: Projektowanie obiektowe. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Read Me 1994.
- [11] Durlik I., Zawadzka L.: Podejmowanie decyzji w procesie projektowania i realizacji systemów produkcyjnych (CAM, CIM). Zarządzanie w przemyśle – teoria i praktyka podejmowania decyzji. Kraków: Wydział Zarządzania AGH 1994.
- [12] Durlik I.: Inżynieria zarządzania, cz. I i II. Warszawa: Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Placet 1995.
- [13] Gackowski Z.: Projektowanie systemów informacyjnych zarządzania. Warszawa: WNT 1974.
- [14] Gasparski W., Staniszewski R., Ziemia S.: Metodologia projektowania inżynierskiego. Warszawa: PWN 1973.
- [15] Gerwin D., Kolodny H.: Management of Advanced Manufacturing Technology. Strategy, Organization & Innovation. John Wiley & Sons, INC 1992.
- [16] Gontarczyk T.: Wprowadzenie do metodologii projektowania banku danych technologicznych. Warszawa: PWN 1981.
- [17] Gontarczyk T.: Adaptacyjna optymalizacja struktury zbiorów danych technologicznych. Warszawa: PWN 1982.
- [18] Harris W.: Bazy danych nie tylko dla ludzi biznesu. Warszawa: WNT 1994.
- [19] Krawczyk H., Wiszniewski B.: Analysis and Testing of Distributed software Applications. Research Studies Press Ltd. (Distributed by Wiley) 1998.
- [20] Krick A. D.: Wprowadzenie do techniki projektowania technicznego. Warszawa: WNT 1979.
- [21] Kubale M.: Introduction to computational complexity. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1994.
- [22] Kubiak B.: Analiza systemów informatycznych. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 1994.
- [23] Kulikowski J. L.: Teoretyczne podstawy organizacji i systemów informacyjnych. Archiwum Automatyki i Telemekhaniki, t. XV, z. 3, 1970.

- [24] Kulikowski J. L.: Wybrane problemy rozwojowe baz danych. W: (Materiały) V Krajowa Konferencja z cyklu Informatyka, Bydgoszcz, 22–23.04.1980.
- [25] Kulikowski J. L.: Elementy teorii systemów informacji w kształceniu inżynierów organizacji i zarządzania. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1993, nr 487, Mechanika 65.
- [26] Kusy A., Brewiński J.: Elastyczne systemy obróbkowe – elementy składowe, konfiguracje i stan rozwoju. Mechanik nr 8, 1988.
- [27] Lis S., Santarek K., Strzelczak S.: Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych. Warszawa: PWN 1994.
- [28] Luggen W. W.: Flexible Manufacturing cells and systems. Prentice Hall 1991.
- [29] Łopatowska J.: Efektywność sterowania procesem wytwórczym w elastycznych systemach produkcji (ESP). Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii 1999.
- [30] Łukasik-Makowska B.: Informatyczne systemy powielarne. Standaryzacja. Weryfikacja. Wdrażanie. Warszawa: PWE 1992.
- [31] Marshall P.: The elements of an integrated CAP/CAM system. W: Control and Programming in Advanced Manufacturing. (Ed. K. Rathmill). IFS, s. 3–12, 1988.
- [32] Martin J.: Organizacja baz danych. Warszawa: PWN 1983.
- [33] Matczewski A.: Zarządzanie produkcją przemysłową. Problemy, metody, środki. Warszawa: PWE 1990.
- [34] Morton T. E., Smunt T. L.: A planning and scheduling system for flexible manufacturing. Proc. First. ORSA/TIMS special Intest Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984, s. 313–326.
- [35] Nadler G.: Introduction to Design Methodology Management science. Vol. 13, No. 10, 1967.
- [36] Niedzielska E. (red): Klasyfikacja i charakterystyka systemów informatycznych z punktu widzenia zastosowań. Informatyka. Wrocław: WSE 1975.
- [37] Niedzielska E., Skwarnik M.: Projektowanie systemów informatycznych. Warszawa: PWE 1993.
- [38] Pankowski T.: Podstawy baz danych. Warszawa: PWN 1992.
- [39] Piotrowski J.: Terminologia z zakresu elastycznej automatyzacji wytwarzania. Mechanik nr 4, 1988.
- [40] Praca zbiorowa (red. J. Górski): Inżynieria oprogramowania w projekcie informatycznym. Warszawa: Wydawnictwo Mikom 1999.
- [41] Praca zbiorowa (red. L. T. Wrotny): Robotyka i elastycznie zautomatyzowana produkcja w 9 tomach. Warszawa: WNT 1991.
- [42] Praca zbiorowa (red. W. Gasparski): Problemy metodologii projektowania. Warszawa: PWN 1977.
- [43] Proces sterowania elastycznym systemem obróbkowym – rozwój i analiza czasu rzeczywistego i procesu pozorowanego. VDI-Z, r. 20, 1976.
- [44] Projekt PN: Obrabiarki do metali. Obrabiarki zautomatyzowane elastyczne i systemy. Nazwy i określenia. Autorzy: L. T. Wrotny, M. Szafarczyk, J. Piotrowski, Z. Olszowski.
- [45] Pawlak Z.: Matematyczne aspekty procesu produkcyjnego. Warszawa: PWE 1969.
- [46] Przepływ przedmiotów w systemie produkcyjnym dla obróbki części obrotowych. VDI-Z, nr 4, 1979.
- [47] Radzikowski W.: Systemy informatyczne wspomagające zarządzanie przedsiębiorstwem. Szkoła Jesienna Organizacji i Zarządzania, Mądralin 1993.
- [48] Ratmirov V. A.: Upravlenie stanleami gibkikh proizvodstvennykh sistem. Moskwa: Mašinostroenie 1987.
- [49] Santarek K., Strzelczak St.: Elastyczne systemy produkcyjne. Warszawa: WNT 1989.
- [50] Sawik T.: Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych. Warszawa: WNT 1992.
- [51] Sawik T.: Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych. Warszawa: WNT 1996.
- [52] Shtub A., Chakracarty A. K.: Selecting parts and loading flexible manufacturing systems. Proc. First ORSA/TIMS. Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984, s. 284–289.
- [53] Sikora J.: Optymalizacja procesów obróbki skrawaniem z zastosowaniem maszyn cyfrowych. Warszawa: WNT 1978.

- [54] Smith A.: Cellular System. Design and Optimization. New York, Maidenhead (UK): McGraw-Hill, Inc. 1996.
- [55] Solberg J. J.: A Mathematical Model of Computerized Manufacturing Systems. Proceedings of the 4th International Conference on Production Research, Tokyo, Japan, August 1977.
- [56] Stecke K. E., Solberg J. J.: Loading and Control Policies for a Flexible Manufacturing Systems. International Journal of Production Research, Vol., No. 5, 1982.
- [57] Stecke K. E.: Useful Models to Address FMS Operating Problems APMS-COMPCONTROL '85, Vol. I, Budapeszt 1985.
- [58] Stecke K. E.: A hierarchical Approach to Solving Machina Grouping and Loading Problems of FMS. Working Paper 331, Division of Research, Graduate School of Business Adm., Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI, 1983.
- [59] Stecke K. E.: Design, planning, scheduling and control problems of FMS. Annals of Operation Research 3, 1985, s. 3–12.
- [60] Stecke K. E., Browne J.: Variations in FMS according to the relevant types of automated material handlin. Material Flow 2, 1985, s. 179–192.
- [61] Stecke K. E., Marin T. L.: Optimality of valancing work lods ich certain types of FMS. Eurgs. J. Opln. Res. 26, 1986, s. 266–272.
- [62] Suri R., Whitney C. K.: Decision support requirements in flexible manufacturing. Journal of Manufacturing Systems 3, 1982, s. 27–38.
- [63] Szumilas E.: Przemysłowe roboty produkcyjne. Mechanik nr 5, 1978.
- [64] Tempelmeier H., Kuchn H.: Flexible Manufacturing Systems. Decision Support for Design and Operation. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [65] Terminology for automated manufacturing and machining systems. The Machine Fod Industry Research Association. August 1985.
- [66] Turski W. M.: Metodologia programowania. Warszawa: WNT 1978.
- [67] Turski W. M.: Struktury danych. Warszawa: WNT 1971.
- [68] Ullman J. D.: Systemy baz danych. Warszawa: WNT 1988.
- [69] Weck M.: Automatisierung und Steuerungstechnik. Düsseldorf: VDI – Verlag GmbH 1973.
- [70] Węglarz J.: Elastyczne systemy produkcyjne III. Szkoła Inżynierii Systemów. Kiekrz 1987.
- [71] Whitney C. K., Suri B.: Decision aids for parts and machine selection. Proc. First ORSA/TIMS Special Interest Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984, s. 295–210.
- [72] Wieczorkiewicz L.: Kierunki i zasady wdrażania kompleksowej automatyzacji w produkcji mało- i średnioseryjnej. Mechanik nr 7 i 8, 1979.
- [73] Wojciechowski J., Brzeski K., Dziewanowski L., Radlak A., Zawadzka L.: Projekt modernizacji procesów technologicznych obróbki skrawaniem w ZUO – „Hydroster” w oparciu o elastyczną modernizację. Etap I. Projekt wstępny perspektywicznej organizacji i technologii wybranych spektrów przedmiotowych w oparciu o elastyczną automatyzację, 1985. Polit. Gdańska, Inst. Technologii (maszynopis).
- [74] Wojciechowski J., Brzeski K., Zalewski A., Zawadzka L.: Projekt modernizacji procesów technologicznych obróbki skrawaniem w ZUO – „Hydroster” w oparciu o elastyczną automatyzację. Etap II. Projekty wstępne węzłowych tematów rozwojowych, 1987. Polit. Gdańska, Inst. Technologii Budowy Maszyn (maszynopis).
- [75] Wójcikowski J.: Problemy elastyczności gospodarczej robotyzacji. III Kongres Nauki Polskiej, Poznań 1988.
- [76] Wrotny L. T.: Rozwój elastycznej automatyzacji – od ASO do ESO i ESW, Mechanik nr 4, 1988.
- [77] Wrotny L. T.: Elastyczne systemy wytwarzania. W: (Materiały) Konferencja „SYPRO”, Polit. Warszawska 1987.
- [78] Wirth S.: Flexible Fertigungssysteme. Gestaltung und Anwendung in der Teilefertigung. Berlin: VEB Verlag Technik 1989.
- [79] Wrotny L. T.: Stan i kierunki rozwoju elastycznej automatyzacji wytwarzania w Polsce na tle techniki światowej. Mechanik nr 8, 1988.
- [80] Wróblewski K.: Podstawy sterowania przepływem produkcji. Warszawa: WNT 1993.

- [81] Yourdon E.: Projektowanie systemów o działaniu bezpośrednim. Warszawa: WNT 1976.
- [82] Zawadzka L.: Metodologiczne aspekty projektowania elastycznych dyskretnych systemów sterowania przebiegiem produkcji wyrobów złożonych. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1980, nr 443, Mechanika 58.
- [83] Zawadzka L.: Podstawowe problemy projektowania elastycznych systemów sterowania przebiegiem produkcji (ESS-PP). Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1993, nr 487, Mechanika 65.
- [84] Zawadzka L.: Technical and economical aspects of simulation of manufacturing process control flexible systems (MPCFS). Volkswirtschaftliche Diskussion-sbeitrge, Nr 69, Otto-Fridrich Universitt, Bamberg, BRD 1993.
- [85] Zawadzka L., Wojciechowski J.: Elastyczny system produkcyjny do obróbki tocznych powierzchni złożonych. Etap II. Projekt wstępny i wybrane elementy projektu technicznego. Cz. 6. System sterowania technologiczno-organizacyjnego w elastycznym systemie tokarskim. 1988, 17 s., Polit. Gdańska, Inst. Technologii Budowy Maszyn, CPBR 7-5, cel nr 5, Zlec. Ośrodek Badawczo-Konstrukcyjny „Koprotech” w Warszawie. (maszynopis).
- [86] Zawadzka L., Tatarczak A.: Projekt modernizacji procesów technologicznych obróbki skrawaniem w ZUO – „Hydroster” w oparciu o elastyczną automatyzację. Etap IV. Wdrożenie struktury konstrukcyjno-technologicznej w ośrodku obliczeniowym ZUO – „Hydroster”, 1988, Polit. Gdańska, Inst. Technologii Budowy Maszyn (prowadzący umowę: J. Wojciechowski) maszynopis.
- [87] Zawadzka L.: Podsystem sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego wyrobów elastycznej stacji tokarskiej. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1993, nr 487, Mechanika 65.
- [88] Zawadzka L.: Informative technologies in flexible manufacturing systems (FMS). W: Simulation designing and control of foundry processes. (Ed. S. Kluska-Nawarecka, H. Połcik, M. Warmuzek, G. Dobrowolski). The 4th International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes FOCOMP '99. Kraków – Aachen – Sofia. Kraków: Inst. Odlewnictwa 1999, s. 217–224.
- [89] Zawadzka L., Łopatowska J.: Algorithms of steering manufacture processes selection in flexible manufacturing system (FMS). W: Simulation designing and control of foundry processes. (Ed. S. Kluska-Nawarecka, H. Połcik, M. Warmuzek, G. Dobrowolski). The 4th International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes FOCOMP '99. Kraków – Aachen – Sofia. Kraków: Inst. Odlewnictwa 1999, s. 209–216.
- [90] Zygiel H.: Metodyka projektowania systemów informatycznych. Warszawa: OBRI 1974.

Rozdział 2

- [1] Akella R., Choong Y., Gershwin S. B.: Performance of hierarchical Scheduling, policy. IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, CHMT-7, 1984.
- [2] Ammons J. C., Lofgren C. B., Moginnis L. F.: A Large scale workstation loading problem. Proc. First ORSA TIMS special Interest Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984, s. 249–255.
- [3] Antoszkiewicz J.: Metody heurystyczne. Warszawa: PWN 1982.
- [4] Bernus P., Nemes L.: Modelling and methodologies for enterprise integration. Chapman, Hall 1996.
- [5] Bilewicz G.: Ekonomiczne aspekty projektowania komputerowych systemów sterowania procesami technologicznymi. W: (Materiały) Konferencja „SYPRO”, Polit. Warszawska 1987.
- [6] Buzacott J., Yao A., David D. W.: Flexible Manufacturing. Systems: A Review of Models, Working Paper No. 7, Ontario, Canada: University of Toronto 1982.
- [7] Buzacott J., Shantikumar J. G.: Models for understanding flexible manufacturing systems. AILE Trans. 12, 1980, s. 339–350.
- [8] Campbell H. G., Dudek R. A., Smith M. L.: A heuristic algorithm for the job m machine sequencing problem. Management science 1970.
- [9] Dubois D.: A mathematical model of a flexible manufacturing systems with limited in process inventory. Europ. J. Opnl. Res. 14, 1983, s. 66–78.

- [10] Egzulu P. J., Tanchoco J. M. A.: Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules. *Internat. J. Prod. Res.* 22, 1984, s. 359–374.
- [11] Evershein W., Hermann P.: Recent trends in flexible automated manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 1, 1982, s. 139–148.
- [12] Gershwin S. B.: Material and Information Flow in an Advanced Manufacturing system. Report LIDS-P-1199. Laboratory for Information and Decision Systems. MIT. Cambridge, MA, 1982.
- [13] Gospodarowicz A.: Harmonogramy przedsięwzięć czasowo-przestrzennych i przybliżone metody ich wyznaczania. Wrocław: Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej nr 321, 1986.
- [14] Hildebrand R.: Scheduling Flexible Manhining Systems When Machines are Prone to Failure. Ph. D. Dissertation, MIT. Cambridge, MA 1980.
- [15] Heitkoetter J., Beasley D.: The Hitch-Hiker's Guide to Evolutionary Computation. <http://www.faqs.org/faqs/ai-faq/>, 2000.
- [16] Kaczmarczyk A., Banaszak Z.: Fabryka przyszłości. W: Podstawowe problemy współczesnej techniki. T. XXV. Robotyka (Red. A. Morecki). Warszawa: PWN 1987, s. 293–325.
- [17] Karg L. R., Thomson G. L.: A heuristic approach to solving the traveling – salesman problem. *Manad. Sci.* 1964.
- [18] Kern W.: Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart 1979.
- [19] Kimemia J. G., Gershwin S. B.: An algorithm for the computer control of production in FMS. *IEE Transactions* 15, 1983, s. 353–362.
- [20] Kimemia J. G.: Hierarchical Control of Production in FMS. Ph. D. Dissertation. MIT Cambridge, MA, 1982.
- [21] Knosala R., Wal T.: Budowa funkcji przystosowania algorytmu genetycznego w procesie harmonogramowania pracy elastycznego gniazda produkcyjnego. W: (Materiały) Konferencja Komputerowo zintegrowane zarządzanie. Zakopane, 12–14.01.1998.
- [22] Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. Warszawa: WNT 1999.
- [23] Morton T. E., Smunt T. L.: A planning and scheduling system for flexible manufacturing. *Proc. First. ORSA/TIMS special Intest Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984*, s. 313–326.
- [24] Müller W.: Heuristischen Verfahren der Productions – planung und Problem ihrer Bezerteilung. W: *Neue Aspekte der betrieblichen Planung.* (Ed. H. Jacob). Wiesbaden 1980.
- [25] Müller-Merbach H.: Morphologie heuristischer Vesfahren *Zeitschrift Für Opns. Res.* 20, 1976.
- [26] Osowski S.: Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. Warszawa: WNT 1996.
- [27] Pawlak M.: Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji. Warszawa: PWN 1999.
- [28] Pawlak M.: Wybrane sposoby reprezentacji i rozwiązywania problemów harmonogramowania przy pomocy algorytmów ewolucyjnych. *Organizacja i zarządzanie. Zesz. nr 1.* Lublin: Wydawnictwo Inst. Zastosowań Techniki 1998.
- [29] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Warszawa: PWN 1997.
- [30] Shtub A., Chakracarty A. K.: Selecting parts and loading flexible manufacturing systems. *Proc. First ORSA/TIMS. Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984*, s. 284–289.
- [31] Solberg J. J., James J.: A Mathematical Model of Computerized Manufacturing Systems. *Proceedings of the 4th International Conference on Production Research, Tokyo, Japan 1977.*
- [32] Stecke K. E., Solberg J. J.: Loading and Control Pelicies for a Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research, Vol. 5, 1982.*
- [33] Stecke K. E.: Useful Models to Address FMS Operating Problems *APMS-COMPCONTROL '85, Vol. I, Budapest 1985.*
- [34] Stecke K. E.: A hierarchical Approach to Solving Machina Grouping and Loading Problems of FMS. *Wlorking Paper 331, Division of Research, Graduate School of Business Adm. Univ. of Michigan, Ann Arbor, MI, 1983.*
- [35] Stecke K. R.: Design, planning, scheduling and control problems of FMS. *Annals of Operation Research* 3, 1985, s. 3–12.

- [36] Stecke K. E., Browne J.: Variations in FMS according to the relevant types of automated material handling. *Material Flow* 2, 1985, s. 179–192.
- [37] Stecke K. E., Marin T. L.: Optimality of valancing work loads in certain types of FMS. *Eur. J. Oper. Res.* 26, 1986, s. 266–272.
- [38] Suri R., Whitney C. K.: Decision support requirements in flexible manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 3, 1982, s. 27–38.
- [39] Tadeusiewicz R.: Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami. Warszawa: Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Placet 1998.
- [40] Terminology for automated manufacturing and machining systems. The Machine Tool Industry Research Association 1985.
- [41] Tiutiukin W. K.: Ob optimalizacii kalendarnoj dlitelnosti obrabotki izdelij pri odinakowej posledovatel'nosti zapuska ich na vsiech stankach. *Optimalnoje planirovanije* 1970.
- [42] Torbic J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania. Warszawa: Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Placet 1994.
- [43] Węglarz J.: Elastyczne systemy produkcyjne. III Szkoła Inżynierii Systemów. Kiekrz 1987.
- [44] Whitney C. K., Gaul T. S.: Sequential decision procedures in batching and balancing in FMS. 1984, 243–248.
- [45] Whitney C. K., Suri B.: Decision aids for parts and machine selection. *Proc. First ORSA/TIMS special Interest Conference on FMS, Ann Arbor, MI, 1984*, s. 295–210.
- [46] Wojciechowski J., Brzeski K., Dziewanowski L., Radlak A., Zawadzka L.: Projekt modernizacji procesów technologicznych obróbki skrawaniem w ZUO – „Hydroster” w oparciu o elastyczną modernizację. Etap I. Projekt wstępny perspektywicznej organizacji i technologii wybranych aspektów przedmiotowych w oparciu o elastyczną automatyzację, 1985. Polit. Gdańska, Inst. Technologii Budowy Maszyn (maszynopis).
- [47] Wojciechowski J., Brzeski K., Zalewski A., Zawadzka L.: Projekt modernizacji procesów technologicznych obróbki skrawaniem w ZUO – „Hydroster” w oparciu o elastyczną automatyzację. Etap II. Projekty wstępne węzłowych tematów rozwojowych, 1987. Polit. Gdańska, Inst. Technologii Budowy Maszyn (maszynopis).
- [48] Wrotny L. T.: Elastyczne systemy wytwarzania. W: (Materiały) Konferencja „SYPRO”, Polit. Warszawska 1987.
- [49] Wrotny L. T.: Rozwój elastycznej automatyzacji – od ASO do ESO i ESW. *Mechanik* nr 4, 1988.
- [50] Wrotny L. T.: Stan i kierunki rozwoju elastycznej automatyzacji wytwarzania w Polsce na tle techniki światowej. *Mechanik* nr 8, 1988.
- [51] Wróblewski J. K.: Prace naukowo-badawcze w zakresie projektowania i optymalizacji harmonogramów rytmicznej produkcji prowadzone w latach 1971–75 w Inst. Organizacji i Zarządzania Wydz. Mech. Techn. Polit. Warszawskiej (maszynopis).
- [52] Zawadzka L.: Podstawowe problemy projektowania elastycznych systemów sterowania przebiegiem produkcji (ESS-PP). *Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej* 1993, nr 487, *Mechanika* 65.
- [53] Zawadzka L.: Podsystem sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego wyrobów elastycznej stacji tokarskiej. *Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej* 1993, nr 487, *Mechanika* 65.
- [54] Zawadzka L.: Współczesne technologie informatyczne w elastycznych systemach produkcyjnych (ESP). W: *Problemy zarządzania i inżynierii produkcji*. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999, s. 35–41.
- [55] Zawadzka L.: Podstawy projektowania elastycznych systemów sterowania produkcją. *Problemy techniczno-ekonomiczne*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2000.

Rozdział 3

- [1] Abt S.: Wdrażanie zintegrowanych systemów zarządzania przedsiębiorstwem. Poznań: *Zesz. Nauk. TNOiK* nr 3, *Wybrane Problemy Organizacji i Zarządzania* 1995.

- [2] Badurek J.: Elementy oceny ESP. 11 Międzynarodowe Sympozjum Naukowe SIMP, WSI, Zielona Góra, 10–12.04.1989.
- [3] Badurek J.: Metody zarządzania bazami danych w ergotransformacyjnych elastycznych systemach produkcji. Rozprawa doktorska. Akademia Ekonomiczna we Wrocławiu 1996.
- [4] Badurek J., Zawadzka L.: Pozatechniczne ograniczenia rozwoju efektywności baz danych elastycznych systemów produkcji. W: Problemy zarządzania i inżynierii produkcji. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999, s. 43–48.
- [5] Berchtold W.: Neue Anforderungen an das Projektmanagement im Bereich der systemintegration. Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik, Heft 187, Heidelberg 1996.
- [6] Beynon P., Davies: Inżynieria systemów informacyjnych. Warszawa: WNT 1999.
- [7] Black D. L.: Scheduling Support for Concurrency and Parallelism in the Mach Operating System. IEEE Computer, nr 5/1990.
- [8] Bobrowski S.: Oracle 7 Server Concepts Manual. Oracle Corporation, Redwood City, USA 1994.
- [9] Bricker A. (ed.): Architectural Issues in Microkernel-based Operating Systems: The Chorus Experience. Computer Communications nr 6/1991.
- [10] Cameron J. (ed.): Comparing software development methods: example. Information and Software Technology, Vol. 33, No. 6, 1991.
- [11] Chajtman S.: Systemy i procesy informacyjne. Warszawa: PWE 1986.
- [12] Chou S. C. (ed.): An executable specification language for specification understanding in object-oriented specification reuse. Information and software technology. Vol. 38, No. 6, Oxford 1996.
- [13] Coad P., Nicola J.: Programowanie obiektowe. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Read Me 1993.
- [14] Coad P., Yourdon E.: Analiza obiektowa. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Read Me 1993.
- [15] Figura D.: Obiektowe bazy danych. Oficyna Wydawnicza Read Me 1996.
- [16] Dyżewski A. (red.): Polski rynek komputerowy. Raport Specjalny Computerworld, Nr 4 (24) IDG Poland S.A., Warszawa 1996.
- [17] Eisele R.: Neues von SQL goes Object-Oriented. Datenbank Fokus, Das Magazin für Client/Server Computing, IT Verlag für innovative Technologien GmbH Höhenkirchen, Nr 2, Februar/März 1995.
- [18] Fisher A. S.: CASE using software development tools. New York: John Wiley & Sons 1991.
- [19] Friedrichs P., Gromotka W.: Fertigungsleittechnik. VDI-Z 134 Nr 10, 1992.
- [20] Gomber P. (ed.): Synergie und Koordination in dezentral planenden Organisationen. Wirtschaftsinformatik, Heft 3, Wiesbaden 1996.
- [21] Hsu J., Lockwood T.: Collaborative computing. BYTE, March 1993.
- [22] Hüskes R.: Heger und Sammler. Endanwender-Datenbanken für Windows und Mac. Hannover: CT Magazin für Computer Technik, Nr 4, 1996.
- [23] Ichikawa H. (ed.): Incremental specification and development of communications software. IEEE Transactions on Computers, Vol. 40, No. 4, 1991.
- [24] Johnson R. N.: Building Plug and Play Networked smart transducers. Sensors Bus for Data Acquisition. Sensors Magazine, March 1998.
- [25] Jenz D.: DV-Strategie Organisation ist alles. Business Computing, Nr 3, Würzburg 1996.
- [26] Konecki K.: Komunikacyjne aspekty funkcjonowania przedsiębiorstwa na przykładzie przedsiębiorstwa japońskiego. Warszawa–Łódź: Organizacja i Kierowanie, nr 3–4, 1992.
- [27] Lis S., Santarek K., Strzelczak S.: Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych. Warszawa: PWN 1994.
- [28] Łukasik-Makowska B.: Informatyczne systemy powielarne. Standaryzacja. Weryfikacja. Wdrażanie. Warszawa: PWE 1992.
- [29] Michta E., Markowski A.: Zintegrowane sieci przemysłowe w systemach pomiarowych obiektów elektroenergetycznych. Warszawa: Pomiary Automatyka. Robotyka (PAR) nr 4, 2000.
- [30] Marciniak S.: Elementy makro i mikroekonomii dla inżynierów. Warszawa: WN PWN 1993.
- [31] Miller R. J.: Bazy danych, język UML w modelowaniu danych. Warszawa: Mikom 2000.
- [32] Muller G.: Ocena elastycznego wytwarzania za pomocą komputerowej analizy procesów produkcyjnych. Systemy produkcyjne teoretyczne i praktyczne problemy projektowania. W: (Materiały) Konferencja „SYPRO”, Polit. Warszawska 1987.

- [33] Nowosielski S.: Podstawy kontrolingu w zarządzaniu produkcją. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu 1994.
- [34] Papazoglou M. P. (ed.): Use of middleware facilities in interoperable databases. New York: Computer Systems Science & Engineering, No. 4, CRL Publishing LTD 1995.
- [35] Pierzgalski W.: Przetworniki pomiarowe P7 w układach sterowania i kontroli procesów przemysłowych. II Sympozjum naukowo-techniczne „Pomiary i sterowanie w procesach przemysłowych”. Zielona Góra 1996, s. 18–25.
- [36] Pilawski B.: Komputer narzędziem organizatora. Warszawa: PWE 1984.
- [37] Pleschak F.: Ekonomika automatyzacji. Warszawa: PWE 1991.
- [38] Reinwald B. (ed.): Storing and using objects in relational database. IBM Systems Journal, Vol. 35, No. 2, Armonk NY 1996.
- [39] Robak S.: Xenix – wielodostępny, wieloprogramowy system operacyjny. Zielona Góra: Mirka 1991.
- [40] Rumbaugh J. (ed.): Object-Oriented Modelling and Design. Englewood Cliffs. Prentice Hall 1991.
- [41] Rzczycka A., Zawadzka L.: Metody oceny przedsięwzięć inwestycyjnych w elastycznych systemach produkcyjnych (ESP). Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1996, nr 525, *Ekonomia* 35.
- [42] Santarek K., Strzelczak S.: Elastyczne systemy produkcyjne. Warszawa: WNT 1989.
- [43] Sneed K. M.: Schätzung der Entwicklungskosten von objektorientierter Software. Berlin-Heidelberg: Informatik Spektrum, Band 19, Heft 3, 1996.
- [44] Stein W.: Objektorientierte Analysemethoden. Berlin-Heidelberg: Informatik-Spektrum, Nr 16, 1993.
- [45] Stein W.: Objektorientierte Analysemethoden für drei praxisrelevante Anwendungsgebiete in Vergleich. Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik, Nr 189, Heidelberg Mi 1996.
- [46] Surrer H., Taubner D.: Objektorientierte Spezifikation mit einem CASE-Werkzeug für Structured Analysis/Structured Design. Berlin-Heidelberg: Informatik Spektrum, Band 19, Heft 4, August 1996.
- [47] Werewka J., Żaba S.: Szeregowanie wiadomości w rozproszonych systemach czasu rzeczywistego wykorzystujących magistrale miejscowe. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji* 1999, s. 25–50.
- [48] Weber V. (ed.): Report Betriebssysteme. Hannover: CT Magazin für Computer Technik, Nr 9, 1996, s. 128–162.
- [49] Yochum D. S. (ed.): An integrated Human resources Approach to Moving Information Technology Professionals Toward Best in Class. New York: AT&T Technical Journal, Vol. 75, No. 1, 1995.
- [50] Zander H.: Planvorgabe. Hannover: CT Magazin für Computer Technik Nr 10, 1992.
- [51] Zawadzka L.: Metodologiczne aspekty projektowania elastycznych, dyskretnych systemów sterowania przebiegiem produkcji wyrobów złożonych. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1990, nr 443, *Mechanika* 58.
- [52] Zawadzka L.: Zastosowanie metodologii Banku Światowego do oceny przedsięwzięć inwestycyjnych w elastycznych systemach produkcyjnych ESP. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1991, nr 467, *Mechanika* 61.
- [53] Zawadzka L.: Podstawowe problemy projektowania elastycznych systemów sterowania przebiegiem produkcji (ESS-PP). Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1993, nr 487, *Mechanika* 65.
- [54] Zawadzka L., Rzczycka A.: Ocena ekonomiczna elastycznego systemu produkcyjnego w fazie eksploatacji. Zesz. Nauk. Polit. Gdańskiej 1996, nr 525, *Ekonomia* 35.
- [55] Zawadzka L.: Współczesne technologie informatyczne w elastycznych systemach produkcyjnych (ESP). W: Problemy zarządzania i inżynierii produkcji. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999, s. 35–41.
- [56] Zekowitz M. V. (ed.): Principles of software engineering and design. New Jersey: Prentice-Hall Inc. 1979.

Rozdział 4

- [1] Badurek J.: Technologie informatyczne w zaawansowanych systemach produkcji. W: Współczesne problemy i modelowanie systemów gospodarczych. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2006.
- [2] Balasubramanian S.: Requirements for holonic manufacturing system control. The First International Workshop on Holonic and Multi-Agent Systems. Greenwich (UK), 6–9.09.2000.
- [3] Committee on Visionary Manufacturing Challenges: Visionary Manufacturing Challenges For 2020. Washington DC, USA: National Academy Press 1998.
- [4] Chajtmn S.: Systemy i procesy informacyjne. Warszawa: PWE 1986.
- [5] Kasperski M. J.: Sztuczna inteligencja. Gliwice: Helion 2003.
- [6] Koestler A.: The Gost in the Machine. New York: Arkana Books 1989.
- [7] Shen W.: Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing. Knowledge and Information Systems, an International Journal 1(2). Heidelberg: Springer Verlag 1999.
- [8] Sugimura N.: A Study on Object Oriented Modelling of Holonic Manufacturing Systems. Osaka: Prefecture University 1997.
- [9] Zawadzka L.: Podstawy projektowania elastycznych systemów sterowania produkcją. Problemy techniczno-ekonomiczne. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2000.
- [10] Zawadzka L., Badurek J.: Technologie agentowe w elastycznej produkcji. W: Inżynieria systemów zarządzania. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2002, s. 75–78.
- [11] Zawadzka L., Badurek J.: Holonowe systemy produkcyjne. W: Inżynieria zarządzania przedsiębiorstwami. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2003, s. 53–57.
- [12] Zawadzka L., Badurek J.: Bioniczne systemy produkcyjne. W: Modelowanie systemów gospodarczych w przedsiębiorstwach europejskich. (Red. L. Zawadzka). Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2004, s. 19–23.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 8,4. Ark. druku 7,25, 55/456

Druk: Przedsiębiorstwo Prywatne *WiB* Piotr Winczewski
ul. Sobieskiego 14, 80-216 Gdańsk, tel. 058 341 99 89