



Politechnika Wrocławska



**Wydział Mechaniczny
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji**

na prawach rękopisu.

PRACA DOKTORSKA

Anna BURDUK

**METODYKA APLIKACJI MODELI
SYMULACYJNYCH W PLANOWANIU
I OCENIE RYZYKA REALIZACJI
PROCESÓW PRODUKCYJNYCH**

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward CHLEBUS

*Słowa kluczowe: proces produkcyjny, system,
ryzyko, niezawodność, model,
modelowanie i symulacja*

Publikacja nie zawiera
nowego rozwiązania technicznego
nadającego się do opatentowania.

WROCŁAW 2004

15.09.2004 r.

RZECZNIK-PATENTOWY

Kozłowska
mgr inż. Regina Kozłowska

Wykaz ważniejszych oznaczeń:

A	- współczynnik asymetrii dla zmiennych empirycznych,
D_s^2	- semiwariancja,
$D(X)$	- odchylenie standardowe zmiennej losowej,
$D^2(X)$	- wariancja zmiennych losowych,
$D_s(X)$	- semiodchylenie standardowe,
$E(X)$	- wartość oczekiwana funkcji strat,
$F(x)$	- dystrybuanta,
$f(x)$	- funkcja gęstości,
$k_g(t)$	- współczynnik gotowości,
k_g^s	- stacjonarny współczynnik gotowości,
m	- wartość średnia zmiennej losowej o rozkładzie normalnym,
M_3	- trzeci moment centralny,
N	- niezawodność,
N_p	- niezawodność procesu przetwarzania T lub inaczej niezawodność podstawowego procesu wytwórczego,
N_w	- niezawodność wejść / wyjść systemu,
N_z	- niezawodność systemu zarządzania,
NU	- nieuszkodzalność,
o	- obiekt,
or_i	- czynnik organizacyjny występujący w i-tym obszarze zdekomponowanego systemu,
O_i	- obszary zdekomponowanego systemu w analizie ryzyka,
OB	- obsługiwalność,
P_i	- funkcja prawdopodobieństwa zmiennej losowej X
P_N	- prawdopodobieństwo działania systemu,
Q	- obszar krytyczny,
r_i	- czynniki ryzyka występujący w i-tym obszarze zdekomponowanego systemu,
R_c	- całkowite ryzyko systemu,
R_i	- ryzyko i-tego obszaru zdekomponowanego systemu,
s	- odchylenie standardowe cechy statystycznej,
s^2	- wariancja cech statystycznych,
s_j	- stan natury,
S	- zbiór stanów natury,
S_i	- strata na analizowanym wskaźniku systemu w i-tym obszarze spowodowana działaniem czynników ryzyka.,
t_e	- oczekiwany czas trwania czynności,

T	- okres reprezentatywny dla prowadzonej analizy i oceny ryzyka,
TR	- trwałość
U	- postać standaryzowana zmiennej losowej,
V	- współczynnik zmienności rozkładu cechy lub zmiennej losowej,
W_{teoret}	- cel systemu przyjęty w analizie ryzyka systemu produkcyjnego, wyrażony mierzalnym lub ilościowym wskaźnikiem,
W_{teoret}^i	- cel i-tego obszaru zdekomponowanego systemu produkcyjnego, wyrażony mierzalnym lub ilościowym wskaźnikiem,
$\bar{x}$	- średnia arytmetyczna,
X	- zmienna losowa,
Z	- zawodność,
ZSI	- zintegrowany system informatyczny,
γ	- współczynnik asymetrii dla zmiennych losowych,
Δt_i	- straty czasu w poszczególnych obszarach zdekomponowanego systemu, spowodowane występowaniem czynników ryzyka,
$\lambda(u)$	- intensywność uszkodzeń w chwili $t = u$,
μ	- intensywność napraw,
σ	- wartość odchylenia standardowego zmiennej losowej o rozkładzie normalnym,
σ_{i-j}^2	- wariancja czasu oczekiwanego,
$\Phi(u)$	- dystrybuanta zmiennej losowej o standardowym rozkładzie normalnym,
$\varphi(u)$	- funkcja gęstości zmiennej losowej o standardowym rozkładzie normalnym.

Spis treści:

Wykaz ważniejszych oznaczeń:	2
Spis treści:	4
Wstęp i zakres pracy	6
Rozdział 1. Pojęcie ryzyka i metody jego oceny	10
1.1 Literaturowe podejścia do ryzyka i grupy jego definicji	11
1.2 Ryzyko i niepewność w procesie podejmowania decyzji	14
1.3 Klasyfikacje ryzyka	15
1.4 Klasyfikacja metod analizy i oceny ryzyka	17
1.5 Statystyczne miary ryzyka	20
1.6 Statystyczne metody analizy i oceny ryzyka	23
1.7 Metody badań operacyjnych analizy i oceny ryzyka	34
1.8 Porównanie metod ilościowych analizy i oceny ryzyka	49
Rozdział 2. Cel, teza i przyjęte zadania badawcze w pracy	51
Rozdział 3. Charakterystyka i modelowanie procesów produkcyjnych	56
3.1 Definicja typy i sposoby dekompozycji procesów produkcyjnych	57
3.2 Elementy systemu i procesu produkcyjnego	59
3.3 Poziomy analizy i struktura systemu produkcyjnego	61
3.4 Wskaźniki systemu produkcyjnego	62
3.5 Charakterystyka wybranych wskaźników oceny systemów produkcyjnych	64
3.6 Modelowanie systemów produkcyjnych	66
3.7 Analiza symulacyjna systemów produkcyjnych	69
Rozdział 4. Niezawodność i ryzyko jako cecha systemu produkcyjnego	74
4.1 System w ujęciu teorii systemów	75
4.2 System produkcyjny w ujęciu teorii systemów	76
4.3 Zarządzanie systemem produkcyjnym	79
4.4 Niezawodność systemu	80
4.5 Niezawodność systemów produkcyjnych	82
4.6 Związek niezawodności i ryzyka	84
4.7 Struktura niezawodnościowa systemów	85
Rozdział 5. Metodyka planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych	92
5.1 Etapy postępowania w metodyce	93
5.2 Przykład zastosowania metodyki	105
Rozdział 6. Charakterystyka systemu produkcyjnego oraz wyników uzyskanych podczas realizacji projektu	113
6.1 Warunki realizacji i cele poszczególnych części projektów	113
6.2 Charakterystyka systemu produkcyjnego i produktu reprezentatywnego	116
6.3 Sposób realizacji i wyniki uzyskane w części [1] projektu –optymalizacji layout'u linii produkcyjnej wyrobu reprezentatywnego	121
6.4 Sposób realizacji i wyniki uzyskane w części [2] projektu –optymalizacji layout'u całego zakładu	124

Rozdział 7. Weryfikacja metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych	128
Rozdział 8. Porównanie opracowanej metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych z wybraną metodą ilościową.....	149
Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski końcowe	156
Bibliografia:	161
Spis rysunków:	169
Spis tabel:.....	172
ZAŁĄCZNIK 1_p Podstawowe charakterystyki zmiennej losowej.....	174
1.1 Wprowadzenie do rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.	175
1.2 Podstawowe miary statystyczne.....	176
1.3 Podstawowe charakterystyki zmiennych losowych ciągłych	178
1.4 Zależności cech	182
ZAŁĄCZNIK 2_p Szczegółowa struktura wyrobu i procesu ramy wózka MD 523.....	184
2.1. Belka poprzeczna	184
2.2. Podłużnica	184
2.3. Belka bujakowa.....	184
2.4. Korpus belki bujakowej	184
2.5 Rama wózka.....	184
ZAŁĄCZNIK 3_p Słownik pojęć i terminów używanych w pracy.....	188

Wstęp i zakres pracy

Każda dziedzina życia i działalności człowieka związana jest z podejmowaniem decyzji, a każdemu z nas zależy, żeby podjęte działania były racjonalne i przyniosły jak najwięcej korzyści lub zadowolenia. Niektóre z decyzji dotyczą czynności prostych lub powtarzalnych, albo też znane są konsekwencje podjętych działań. Mówi się wówczas o decyzjach rutynowych i o warunkach pewności. Gdy decyzje dotyczą podjęcia czynności wcześniej nierealizowanych, skomplikowanych lub odnoszących się do dalszej przyszłości, wtedy mówi się o ryzyku obarczającym te działania i o warunkach niepewności. Niepewność i ryzyko związane z podejmowaniem decyzji dotyczących przyszłości zależą od upływu czasu i rosną wraz z jego wydłużaniem się. Rośnie również prawdopodobieństwo, że wartość rzeczywiście osiągnięta będzie znacznie odbiegać od wartości oczekiwanej. Podobnie kształtuje się niepewność i ryzyko związane z podejmowaniem decyzji wcześniej nierealizowanych, skomplikowanych lub złożonych. Jednak tutaj ich wzrost zależy od ilości zmiennych rozpatrywanych przy podejmowaniu decyzji.

Powyższe stwierdzenia nabierają szczególnego znaczenia w odniesieniu do warunków działania współczesnych przedsiębiorstw. Obecnie przedsiębiorstwa, aby utrzymać się na rynku, zmuszone są do ciągłego rozwoju poprzez wyznaczanie sobie nowych celów, dostosowywanie do zmieniającego się otoczenia oraz do upatrywania w tych zmianach szans dla swojej działalności. Zazwyczaj odbywa się to poprzez nowe inwestycje w technologię i produkty oraz zmiany w sposobie organizacji. Zarówno otoczenie przedsiębiorstw, jak i one same, stają się coraz to bardziej dynamiczne i złożone. W konsekwencji powoduje to wzrost niepewności i ryzyka podejmowanych decyzji. Coraz większego znaczenia w procesie zarządzania przedsiębiorstwem nabiera również funkcja planowania. Związane jest to z podejmowaniem właściwych decyzji dotyczących rozwoju, ponieważ od podjętych decyzji zależy pozycja firmy na rynku, jej konkurencyjność, poziom generowanych zysków i inne czynniki określające sukces. Podejmowane decyzje mają wpływ na sytuację firmy w chwili ich podejmowania, jak i w jej przyszłości, dlatego każda znacząca dla funkcjonowania przedsiębiorstwa decyzja powinna zostać poprzedzona analizą i oceną ryzyka.

Motywacją przy wyborze tematu pracy były obserwacje specyfiki dzisiejszej sytuacji gospodarczej przedsiębiorstw produkcyjnych oraz wynikająca z nich potrzeba włączenia planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych do systemu analiz ekonomicznych. Mimo iż obecnie ryzyko działalności gospodarczej jest równie wysokie na rynku produkcyjnym, usługowym i finansowym, to widoczne są znaczne różnice w liczbie pozycji literaturowych, szkoleń i konferencji naukowych z tego zakresu.

Sytuacja ta przekłada się w prosty sposób na liczbę metod planowania, analizy i oceny ryzyka na niekorzyść sfery produkcyjnej, w której planowanie i ocena ryzyka jest niedoceniana i bardzo słabo rozwinięta. Dostępnych jest wiele pozycji w literaturze z zakresu zarządzania, analizy i oceny ryzyka kredytowego, ubezpieczeniowego, handlowego, informatycznego i innych, natomiast zauważalny jest brak opracowań literaturowych dla przedsiębiorstw i procesów produkcyjnych.

Specyfika produkcji wymaga odmiennego podejścia do pojęcia ryzyka niż ma to miejsce np. w finansach, w których większe ryzyko inwestycji wiąże się zazwyczaj z możliwością uzyskania większych zysków. Z powodu ograniczeń technicznych i technologicznych, w obszarze produkcji nie można spodziewać się efektów większych od możliwych do uzyskania przy danej technologii lub organizacji pracy. Znacznie właściwszym wydaje się traktowanie ryzyka w kontekście prawdopodobieństwa niezrealizowanych celów produkcyjnych i zawodności systemu produkcyjnego. Dlatego opracowanie metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych oraz propozycji włączenia jej do systemu analiz ekonomicznych przedsiębiorstw przemysłowych wydaje się celowe, i wynika ze specyfiki dzisiejszej sytuacji gospodarczej. Z uwagi na charakter i znaczenie dla przedsiębiorstw przemysłowych realizacji procesów produkcyjnych, niezbędnym w planowaniu i ocenie ryzyka wydaje się wykorzystanie metod i narzędzi symulacyjnych.

W niniejszej pracy została opracowana i zweryfikowana, na przykładzie praktycznym, metodyka aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Z uwagi na złożoność systemów produkcyjnych metodyka może być stosowana dla dowolnej dekompozycji systemu produkcyjnego, w zależności od celu przeprowadzanej analizy. W celu identyfikacji obszarów o najwyższym poziomie ryzyka i późniejszej ich eliminacji, dokonano próby przeniesienia na grunt analiz systemów produkcyjnych teorii niezawodności oraz przedstawiono system produkcyjny zgodnie z założeniami teorii systemów.

Opracowanie metodyki poprzedzono analizą literaturową z zakresu podejść, definicji i klasyfikacji ryzyka. Z powodu ich mnogości przeprowadzono syntezę i przedstawiono jedynie wybrane grupy definicji i klasyfikacji. Z uwagi na rozległość tematyki praca ogranicza się do obszaru zarządzania procesami produkcyjnymi oraz do metod ilościowych analizy i oceny ryzyka poziomu operacyjnego. Pomijane są natomiast ogólne metody analizy i oceny ryzyka, jak również podejścia psychologiczne, socjologiczne i finansowe. Ze względu na brak w literaturze analitycznego opisu metod statystycznych analizy i oceny ryzyka, w pracy opisano te metody oraz zilustrowano je przykładami. Dodatkowo przedstawiono podstawowe miary statystyczne ryzyka i metody badań operacyjnych. Wybraną metodę ilościową porównano z opracowaną metodyką.

Opracowana metodyka została zweryfikowana poprzez przeprowadzenie procesu planowania i analizy ryzyka w przedsiębiorstwie przemysłowym.

Praca składa się z następujących rozdziałów:

Rozdział 1. Pojęcie ryzyka i metody jego oceny

Zawiera genezę dzisiejszego rozumienia terminu „ryzyka” oraz podejścia do ryzyka w literaturze światowej. Przedstawia wybrane grupy definicji i klasyfikacji ryzyka. Prezentuje najczęściej spotykane w literaturze metody analizy i oceny ryzyka. Ze względu na zakres i tematykę pracy, szczegółowa klasyfikacja przedstawiona jest jedynie dla metod ilościowych. Opisane zostały podstawowe statystyczne miary ryzyka, metody statystyczne i metody badań operacyjnych wykorzystywane w literaturze do analizy i oceny ryzyka produkcyjnego. Ponieważ metody statystyczne opisywane są zazwyczaj na wybranych przykładach, zawężających możliwości ich zastosowań, zastosowano opis analityczny i zilustrowano go przykładami. W podsumowaniu rozdziału dokonano porównania opisanych metod ze względu na wybrane kryteria.

Rozdział 2. Cel, teza i przyjęte zadania badawcze

Odniesiono się do analizy literaturowej przedstawionej w rozdziale 1 z zakresu ryzyka oraz metod jego analizy i oceny. Wskazano na braki i przyczyny uniemożliwiające wykorzystanie definicji, klasyfikacji oraz metod oceny ryzyka w systemach produkcyjnych. Zdefiniowano cel główny pracy, tezę, wyznaczono zadania naukowe i praktyczne.

Rozdział 3. Charakterystyka i modelowanie procesów produkcyjnych

Zawiera charakterystykę systemów oraz opis elementów wchodzących w skład procesu produkcyjnego, możliwości jego dekompozycji oraz poziomów analizy. Scharakteryzowano podstawowe wskaźniki procesu produkcyjnego i ich rolę w systemie zarządzania. Przedstawiono możliwości modelowania i symulacji systemów produkcyjnych, rodzaje modeli i zadania modelowania, przebieg eksperymentu symulacyjnego oraz rodzaje symulacji, ze szczególnym uwzględnieniem symulacji ciągłej i dyskretnej procesów produkcyjnych. Omówiono wady i zalety stosowania symulacji.

Rozdział 4. Niezawodność i ryzyko jako cecha systemu produkcyjnego

Zdefiniowano system produkcyjny w ujęciu teorii systemów oraz przedstawiono podstawowe zagadnienia teorii niezawodności. Zaproponowano włączenie podstawowych charakterystyk niezawodnościowych do systemu analiz procesów produkcyjnych. Pozwoliło to na wykazanie związku niezawodności i ryzyka jako synonimu zawodności systemu produkcyjnego. Omówiono podstawowe typy struktur niezawodnościowych systemów oraz zilustrowano je przykładami odpowiednimi dla systemów produkcyjnych.

Rozdział 5. Metodyka planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

Przedstawiono etapowy sposób postępowania w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Zaprezentowano własną metodę wyznaczania wielkości i struktury ryzyka w oparciu o rodzaj struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego oraz strat spowodowanych występowaniem czynników ryzyka w poszczególnych obszarach dowolnie dekomponowanego systemu. Zaproponowano konstrukcję współczynników wagowych, uniezależniających poziom ryzyka od poziomu organizacji systemu produkcyjnego. Etapy metodyki zilustrowano prostym przykładem wyznaczenia ryzyka dla procesu produkcyjnego korpusu belki bujkowej.

Rozdział 6. Charakterystyka systemu produkcyjnego oraz wyników uzyskanych podczas realizacji projektu

Opisano warunki, sposób realizacji, cele oraz wyniki uzyskane podczas realizacji projektu w przedsiębiorstwie przemysłowym. Scharakteryzowano system produkcyjny. Z uwagi na obszerność tematyczną projekt został podzielony na części. Ponieważ wyniki części wcześniejszych stanowiły dane wejściowe dla kolejnych części, a weryfikacja metodyki stanowiła ostatnią część projektu, to niniejszy rozdział jest opisem sposobu realizacji oraz uzyskanych wyników pierwszych części projektu.

Rozdział 7. Weryfikacja metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

Dla scharakteryzowanego w rozdziale 6 systemu produkcyjnego ram wózków przeprowadzono aplikację modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka. Oceny i planowania ryzyka dokonano przy wykorzystaniu danych pochodzących z przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych na modelach procesu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego oraz całego zakładu.

Rozdział 8. Porównanie opracowanej metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych z wybraną metodą ilościową

Porównano metodykę planowania i oceny ryzyka z wybraną metodą zaprezentowaną w rozdziale 1. Do celów porównawczych wybrano metodę PERT, należącą do metod badań operacyjnych. W celu otrzymania wiarygodnych wyników, porównanie przeprowadzono na tym samym przykładzie praktycznym, na którym przeprowadzono, w rozdziale 7, weryfikację metodyki.

Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski

Załącznik 1. Podstawowe charakterystyki zmiennej losowej

Załącznik 2. Szczegółowa struktura wyrobu i procesu ramy wózka md 523

Załącznik 3. Słownik pojęć i terminów używanych w pracy

Rozdział 1. Pojęcie ryzyka i metody jego oceny

Zawiera genezę dzisiejszego rozumienia terminu „ryzyko” oraz podejścia do ryzyka w literaturze światowej. Przedstawia wybrane grupy definicji i klasyfikacji ryzyka. Prezentuje najczęściej spotykane w literaturze metody analizy i oceny ryzyka. Ze względu na zakres i tematykę pracy, szczegółowa klasyfikacja przedstawiona jest jedynie dla metod ilościowych. Opisane zostały podstawowe statystyczne miary ryzyka, metody statystyczne i metody badań operacyjnych wykorzystywane w literaturze do analizy i oceny ryzyka produkcyjnego. Ponieważ metody statystyczne opisywane są zazwyczaj na wybranych przykładach, zawężających możliwości ich zastosowań, zastosowano opis analityczny i zilustrowano go przykładami. W podsumowaniu rozdziału dokonano porównania opisanych metod ze względu na wybrane kryteria.

Słowo „ryzyko” (termin angielski: *risk*, francuski: *risque*, niemiecki: *Risiko*) pochodzi od staro włoskiego „*risicare*”, co oznacza odważyć się, przy czym pojęcie należy kojarzyć raczej z wolnym wyborem niż z nieuchronnym przeznaczeniem [83]. Ryzyko, jako zjawisko, towarzyszy stale każdej decyzji dotyczącej działalności gospodarczej i życiowej człowieka. Nie da się go wyeliminować, ponieważ związane jest z podejmowaniem decyzji i odnosi się do przyszłości, z którą związane jest nierozzerwalnie pojęcie „niepewności”. Powoduje to, że terminu „ryzyko” używa się powszechnie, mówiąc o różnych działaniach i dziedzinach życia człowieka.

Pierwsze próby naukowej syntezy tego pojęcia pojawiły się w pracy A.H. Wiletta w 1901r. Autor w swojej teorii wyszedł z założenia, że powszechnie stosowany termin ryzyko jest pojęciem wieloznacznym, lecz ściśle związanym z pojęciem niepewności [111]. Ponieważ niepewność jest również pojęciem wieloznacznym, ekonomiczna teoria ryzyka Wiletta nie została w pełni zaakceptowana, lecz wzbudziła szereg kontrowersji. Kolejnym etapem ewolucji definicji ryzyka była teoria F. Knighta wysunięta w latach 20 [30]. Koncepcja ta przedstawiała niepewność jako związek dwóch składowych niepewności: mierzalnej i niepewności niemierzalnej. Pierwszą nazwano ryzykiem, drugą natomiast niepewnością sensu stricto.

W latach 60 - 70 nastąpił prawdziwy przełom, kiedy to pojawiło się wiele definicji związanych z pojęciem ryzyka ubezpieczeniowego. W 1966 r. Komisja do spraw Terminologii Ubezpieczeniowej opublikowała oficjalną definicję ryzyka. Określała ona ryzyko jako „*niepewność, co do wystąpienia określonego zdarzenia w warunkach istnienia dwóch lub więcej możliwości*” [103]. Do dziś praktycznie nie powstała żadna uniwersalna definicja ryzyka, co należy wiązać z jego wieloaspektowym znaczeniem.

1.1 Literaturowe podejścia do ryzyka i grupy jego definicji

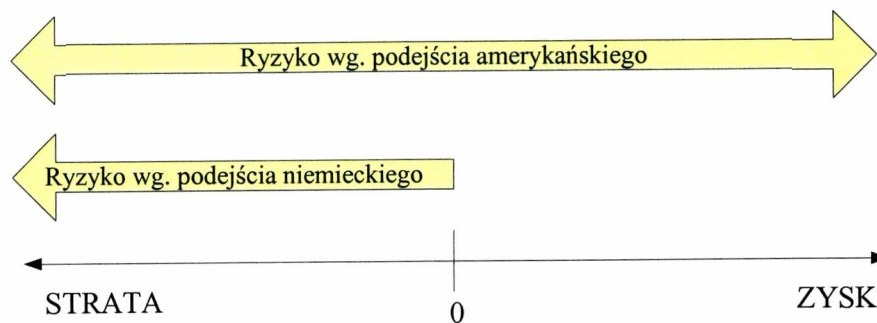
Wieloznaczność pojęcia oraz brak sprecyzowanej jasno definicji spowodowały, iż w literaturze spotkać można różne podejścia do tematu ryzyka. Najbardziej rozpowszechnionymi podejściami są: podejście niemieckie, amerykańskie i badawcze.

Podejście niemieckie ogranicza treść pojęcia ryzyka do osiągnięcia negatywnego skutku w wyniku podjętej decyzji, czyli traktuje ryzyko jako „*niebezpieczeństwo nie zrealizowania celu założonego przy podejmowaniu określonej decyzji*” [34]. Nieosiągnięcie celu może się wyrazić zarówno wystąpieniem straty, jak i niższym od założonego, wynikiem. W dalszej części pracy będzie stosowane podejście niemieckie.

Rozszerzeniem tego podejścia jest podejście amerykańskie, traktujące ryzyko nie tylko w kategorii możliwości poniesienia straty, ale również osiągnięcia zysku. W podejściu amerykańskim rozróżnia się dwie kategorie ryzyka [103]:

- Ryzyko czyste (ryzyko stałe, ang. *pure risk, static risk*). Dotyczy potencjalnego wystąpienia straty. Ryzyko to jest trudne do opanowania i kontroli ze względu na to, że największy wpływ na nie mają czynniki zewnętrzne, niezależnie od podejmowanych działań. Kierowanie się tym ryzykiem jest praktycznie niemożliwe. Należy jednak się z nim liczyć i zawsze brać je pod uwagę. Jego cechą charakterystyczną jest to, że występuje zawsze i nie ulega zmianom. Typowym zabezpieczeniem od tego rodzaju ryzyka są ubezpieczenia i stosowanie środków zapobiegających powstawaniu szkody. Do tej kategorii należy np. ryzyko pożaru, wybuchu, choroby, zgonu itp.
- Ryzyko dynamiczne (ang. *speculative risk, dynamic risk*). Jest to ryzyko, które może prowadzić zarówno do pozytywnego, jak i negatywnego wyniku. Podejmowane jest świadomie w celu osiągnięcia wyniku pozytywnego (zysku), lecz istnieje szansa, że doprowadzi do wyniku negatywnego (straty). Według tego podejścia jest ono utożsamiane z odchyleniem od zamierzonych efektów (odchylenie może być dodatnie lub ujemne) [37]. Z takim rozumieniem zagadnienia najczęściej można się spotkać w literaturze odnoszącej się do zagadnień rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej [77].

Zaprezentowane powyżej podejścia przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Koncepcja ryzyka według podejścia amerykańskiego i niemieckiego

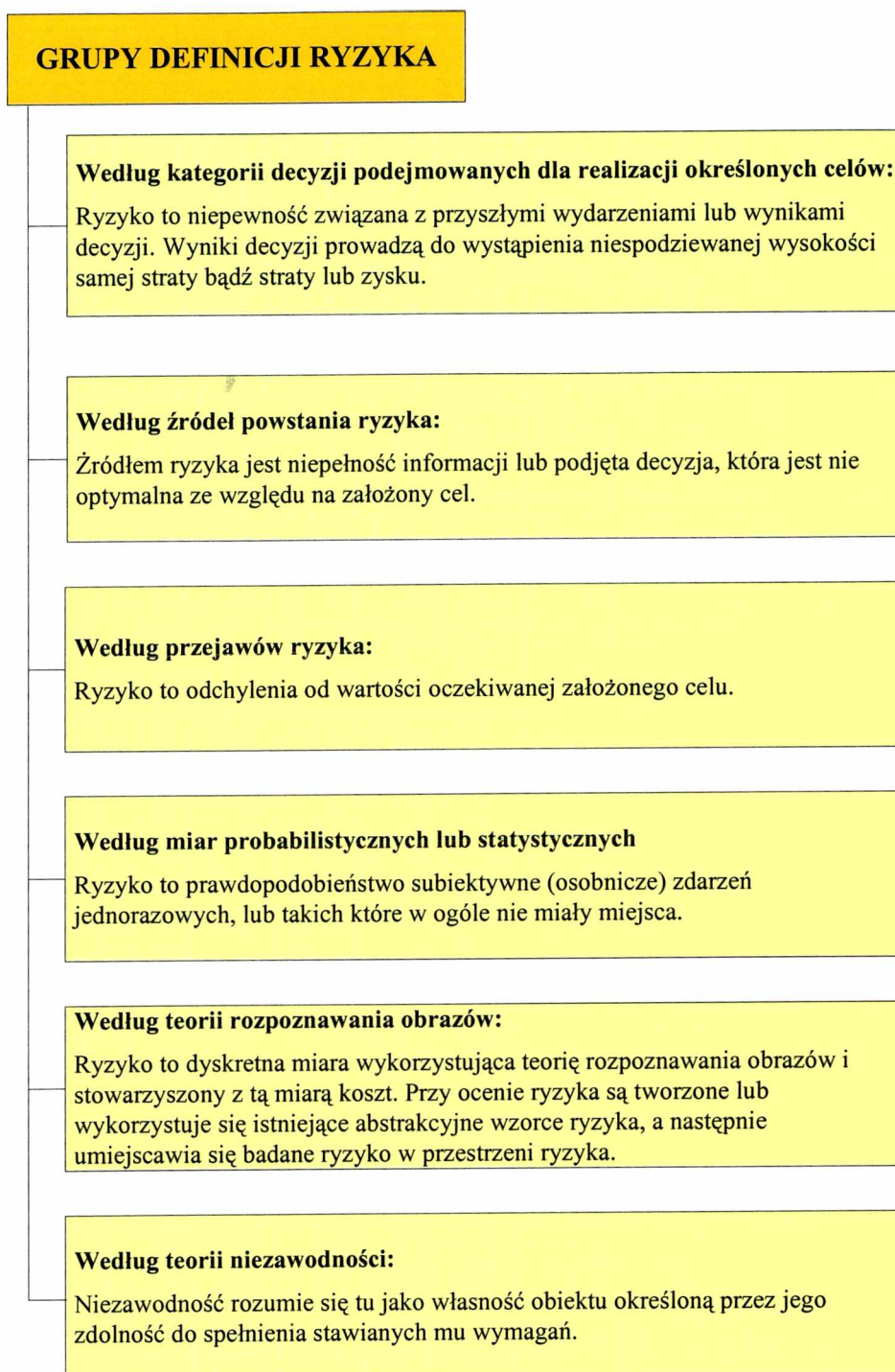
Kolejnym podejściem, równie często spotykanym w literaturze, jest podejście badawcze. Traktuje ono ryzyko jako „(...) sytuację, w której przyszłych warunków gospodarowania nie można przewidzieć z całą pewnością, znany jest natomiast rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia tych warunków” [33]. Dodatkowo w podejściu tym przyjmuje się, że [103]:

- ryzyko dotyczy rozkładu zmiennej losowej, np. wielkości sprzedaży, wielkości kosztów, wielkości zysku itd.,
- miarą ryzyka jest stopień dyspersji (rozproszenia) zmiennej losowej,
- im większy jest stopień dyspersji zmiennej losowej, tym większe jest ryzyko,
- określenie: ryzyko wynosi $X\%$ oznacza, że dana wielkość może się zmieniać w granicach $\pm X\%$ od wyznaczonej wartości.

Z powodu wyżej wymienionych podejść do ryzyka w literaturze można spotkać wiele jego definicji. Jest ono rozumiane w różny sposób i może oznaczać [7, 77, 100, 101, 102, 103, , 111]:

- możliwość poniesienia straty,
- prawdopodobieństwo poniesienia straty,
- rozbieżność między rzeczywistymi i oczekiwanymi wynikami,
- prawdopodobieństwo wyniku innego od oczekiwanego,
- możliwość wystąpienia niepożądanych zdarzeń,
- warunki, w których występuje możliwość straty,
- niepewność, niebezpieczeństwo, możliwość nie zrealizowania celu.

Ponieważ ryzyko jest zjawiskiem powszechnym, występuje we wszystkich dziedzinach życia i ma charakter interdyscyplinarny, jego analizą zajmuje się wiele dziedzin naukowych, np.: rachunek prawdopodobieństwa, statystyka, ekonometria, teoria rozpoznawania obrazów, teoria niezawodności, badania operacyjne, teoria organizacji i zarządzania, psychologia, socjologia, filozofia i inne. Mnogość podejść do ryzyka i jego definicji powoduje bezcelowość przytaczania ich wszystkich, jednak na podstawie analizy oraz pozycji [7, 49, 51, 73, 77, 103, 111,] można podzielić je na następujących 6 grup przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Wybrane grupy definicji ryzyka

Na podstawie analizy wyżej wymienionych podejść i grup definicji ryzyka można stwierdzić, że interpretacja pojęcia zależy od podmiotu zainteresowanego jego analizą. Przedstawione powyżej grupy definicji pokazują, że jest ono pojęciem obszernym i wieloznacznym oraz że nie ma jednoznacznej interpretacji, co należy łączyć z jego ambiwalentnością. Ryzyko stwarza szansę powodzenia, ale równocześnie grozi niepowodzeniem. Ponadto ryzyko jest pojęciem uniwersalnym, ponieważ dotyczy wszystkich aspektów życia.

W zależności od dziedziny można wyróżnić między innymi: ryzyko kataklizmu, ryzyko finansowe, ryzyko kredytowe, ryzyko ubezpieczeniowe, ryzyko rynku, ryzyko przekroczenia ram czasowych i inne. Każde z nich będzie określała inna definicja i inny model matematyczny. Trudności w precyzyjnym zdefiniowaniu ryzyka polegają również na tym, że może ono mieć zarówno jedno-, jak i dwukierunkowy charakter. To, czy ryzyko jest jedno-, czy dwukierunkowe, zależy od obszaru zainteresowania, a także od przyjętego modelu i czynników na nie wpływających.

1.2 Ryzyko i niepewność w procesie podejmowania decyzji

Zarządzanie organizacją gospodarczą jest ciągiem procesów decydowania i tworzenia warunków skutecznej realizacji decyzji [77]. Sytuację decyzyjną w przedsiębiorstwie można przedstawić w różny sposób, np. w postaci macierzy decyzyjnej, drzewa decyzyjnego, modelu matematycznego. Macierz decyzyjną, zwaną także macierzą konsekwencji, przedstawia tabela 1.

Tabela 1 Macierz decyzyjna [50]

Warianty działania	Stany natury				
	S_1	...	S_2	...	S_n
A_1	OK_{11}	...	OK_{12}	...	OK_{1n}
•			•		
•			•		
•			•		
A_2	OK_{21}	...	OK_{22}	...	OK_{2n}
•			•		
•			•		
•			•		
A_m	OK_{m1}	...	OK_{m2}	...	OK_{mn}

Oznaczenia:

A – warianty decyzyjne,

S – możliwe stany natury,

OK – oczekiwane korzyści.

Podejmowanie decyzji gospodarczych to „kreowanie lub przewidywanie możliwych wariantów zdarzeń (tzw. stanów natury) i działań w celu gospodarowania, ich analiza oraz selekcja” [104]. Aby dokonać oceny, która decyzja jest lepsza a która gorsza (przy danym stanie natury), należy porównać korzyści z nich wynikające. Oczekiwana korzyść (OK) związana z daną decyzją musi być zatem odpowiednio zmierzona. Wielkość używana do pomiaru i wyrażenia korzyści nazywana jest zmienną celu [50]. Zmienna ta

odzwierciedla cel działania, dla którego osiągnięcia poszukuje się rozwiązania problemu decyzyjnego i najlepszej decyzji.

W literaturze istnieje wiele klasyfikacji problemów decyzyjnych, jednak, z punktu widzenia celów sformułowanych w tej pracy, poniżej przedstawiono klasyfikację ze względu na stopień pewności. Decyzje dzielą się na [50, 77, 101]:

1. Decyzje podejmowane w warunkach pewności

Gdy znane są wszystkie możliwe wyniki działań będących przedmiotem wyboru albo stan natury składa się tylko z jednego elementu, wówczas podejmujący decyzję ma pewność co do tego, jaki stan natury wystąpi.

2. Decyzje podejmowane w warunkach ryzyka

Podejmującemu decyzję znany jest rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych stanów natury, który może wynikać z teoretycznych założeń lub być rozkładem empirycznym obserwowanym w przeszłości. Może też wynikać z subiektywnej oceny podejmującego decyzję co do szans wystąpienia poszczególnych stanów natury. Są najczęstszym rodzajem podejmowanych decyzji.

3. Decyzje podejmowane w warunkach niepewności

Występują wówczas, kiedy podejmujący decyzję nie ma żadnych informacji o prawdopodobieństwie realizacji stanów natury lub gdy np. dany problem decyzyjny rozważany jest po raz pierwszy i nie można korzystać z wcześniejszych doświadczeń.

1.3 Klasyfikacje ryzyka

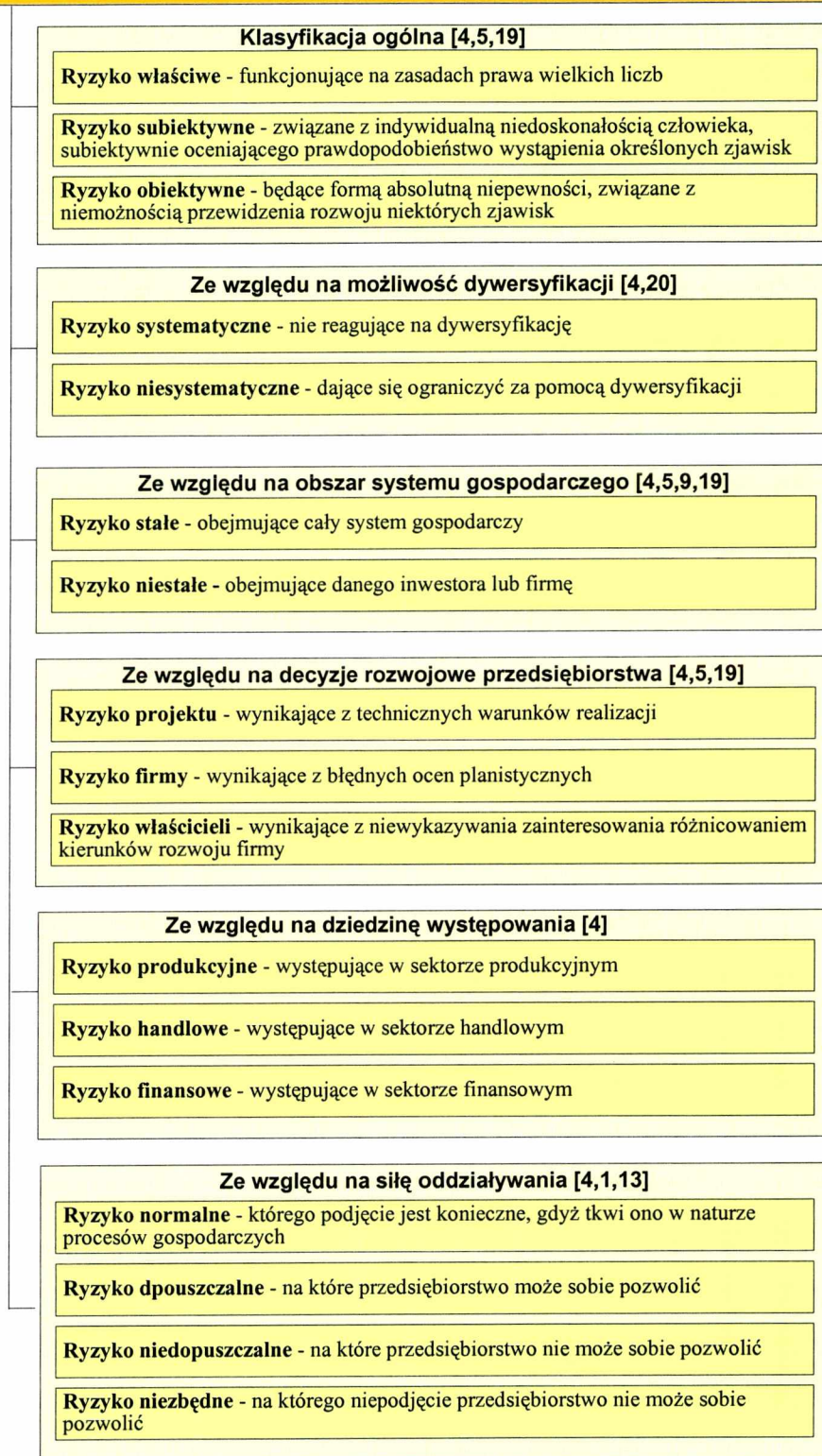
Dokonując klasyfikacji ryzyka należy posłużyć się wieloma kryteriami, uzyskując w ten sposób wiele zbiorów różnych rodzajów ryzyka. Analizując rodzaje klasyfikacji ryzyka prezentowane w literaturze można stwierdzić, że ich mnogość wynika z dwóch przyczyn:

1. wielości dziedzin, w których występuje i
2. sposobu traktowania:
 - jako rozbieżności między rzeczywistością a możliwością lub
 - jako relacji między odpowiedzialnością a skutkiem.

W niniejszej pracy, z uwagi na rozległość zagadnienia, klasyfikacja ryzyka zostanie ograniczona do ryzyka ekonomicznego i gospodarczego oraz jedynie do typów ryzyka najczęściej spotykanych w literaturze. Przytoczenie wszystkich możliwych

klasyfikacji wydaje się niemożliwe i, ze względu na cel pracy, nieprzydatne. Rysunek 3 przedstawia schemat klasyfikacji ryzyka ekonomicznego i gospodarczego.

TYPY RYZYKA EKONOMICZNEGO I GOSPODARCZEGO WEDŁUG RÓŻNYCH AUTORÓW



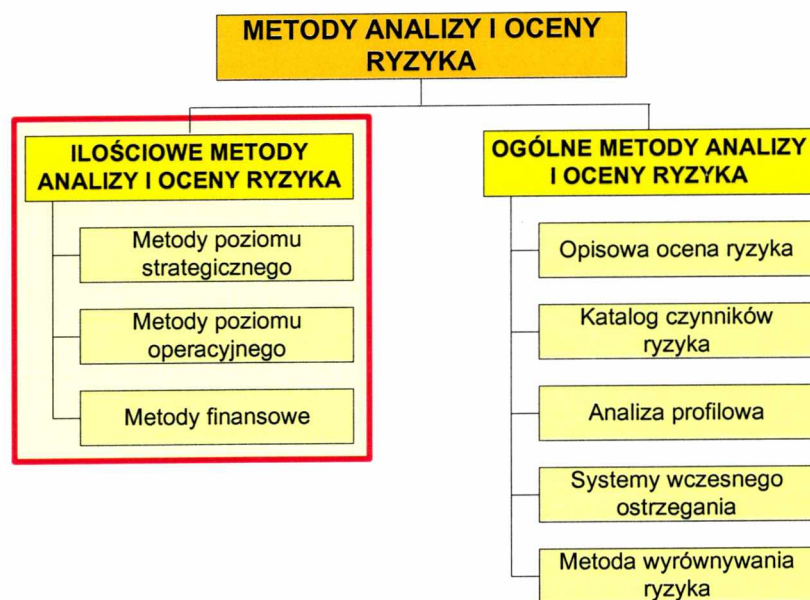
Rys. 3. Wybrane typy ryzyka gospodarczego i ekonomicznego spotykane w literaturze

1.4 Klasyfikacja metod analizy i oceny ryzyka

W literaturze można spotkać wiele metod analizy i oceny ryzyka w przedsiębiorstwie. Ponieważ, jak już wspomniano, ryzyko jest pojęciem wieloznacznym i występującym w wielu dziedzinach gospodarczych, również metody jego oceny pochodzą z różnych dziedzin i dyscyplin naukowych. Autorzy publikacji różnie klasyfikują i nazywają poszczególne metody oceny i analizy ryzyka (porównaj [7, 77, 83, 103, 111,]), jednak najczęściej w literaturze wymieniane są dwie klasy metod:

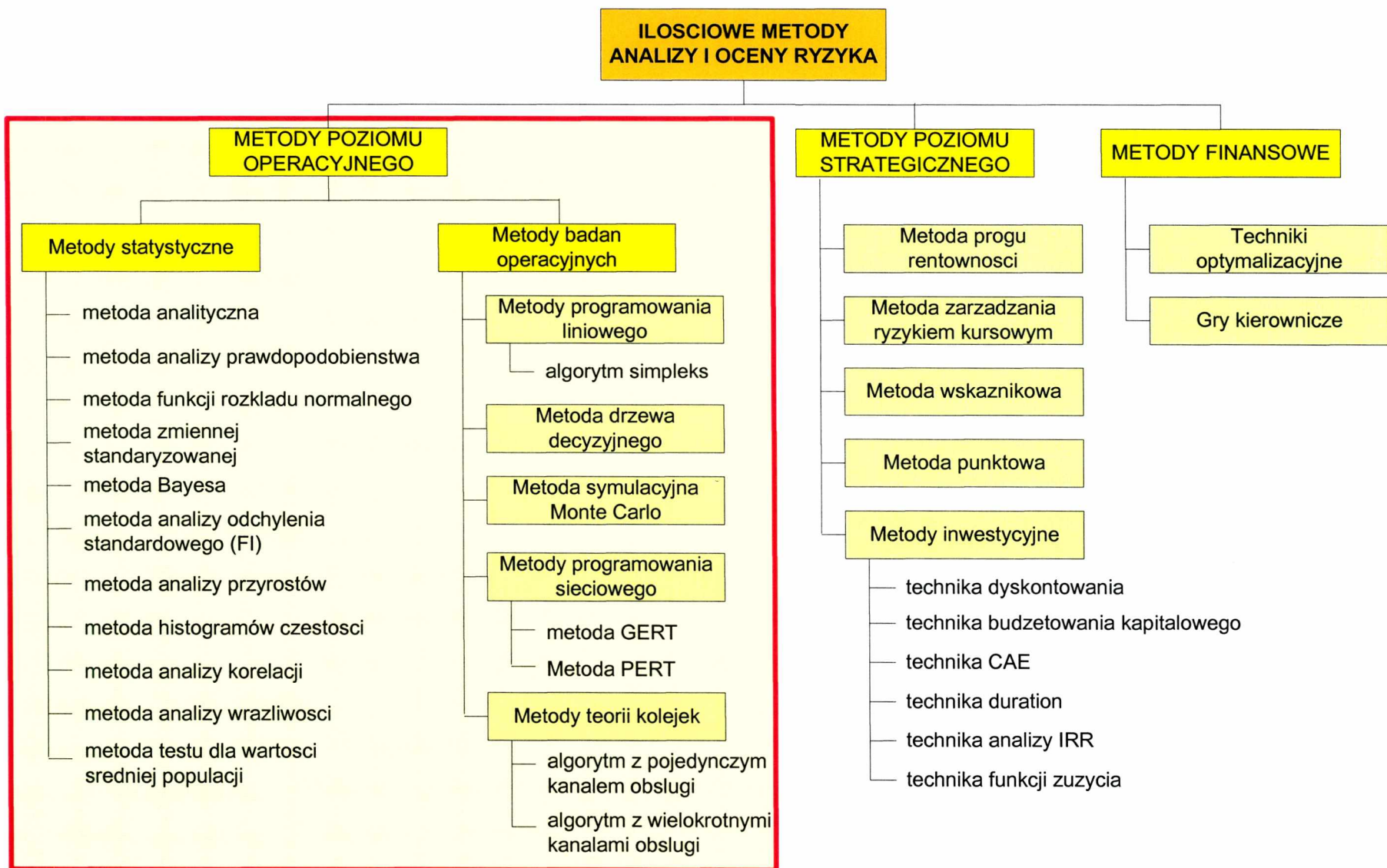
1. Klasa metod werbalnych, nazywanych również opisowymi lub ogólnymi, pozwalająca na poznanie natury występującego ryzyka w organizacji.
2. Klasa metod mierzalnych, nazywanych również ilościowymi, pozwalająca na oszacowanie wielkości ryzyka i wykorzystująca dane liczbowe.

Do wymienionych powyżej klas zalicza się poszczególne grupy metod analizy i oceny ryzyka. Również tutaj literatura różnie kwalifikuje poszczególne grupy metod do klas. Na rysunku 4 przedstawiono obydwie klasy metod, wraz z wyróżnionymi w nich grupami.



Rys. 4. Klasy i grupy metod analizy i oceny ryzyka (na podstawie [77])

Ponieważ zarządzanie procesem produkcyjnym ma charakter operacyjny, a sterowanie nim wymaga wykorzystywania szczegółowych danych liczbowych na temat jego przebiegu, przedmiotem dalszej analizy będą jedynie metody ilościowe poziomu operacyjnego. Ogólnie, na poziomie operacyjnym mogą być wykorzystywane metody statystyczne i metody badań operacyjnych. Na rysunku 5 przedstawiono wszystkie grupy metod ilościowych analizy i oceny ryzyka ze szczegółowym uwzględnieniem metod poziomu operacyjnego.



Rys. 5. Ilościowe metody analizy i oceny ryzyka

Klasyfikacja metod badań operacyjnych nie nastęrcza problemów, ponieważ dziedzina ta jest stosunkowo dobrze rozwinięta. Pewną trudność stanowi przeprowadzenie klasyfikacji metod statystycznych. Głównym problemem jest mała liczba pozycji literaturowych z tego zakresu, gdyż większość autorów analizuje i ocenia ryzyko na poziomie strategicznym lub w obszarze finansów, pomijając wagę ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem produkcyjnym na poziomie operacyjnym. Przedstawienie metod poziomu operacyjnego znajduje się między innymi w pracach [7, 77, 103, 111,].

Kolejnym problemem jest brak obiektywnego i naukowego opisu tych metod wykorzystujących rachunek prawdopodobieństwa i statystykę matematyczną. Ponieważ pozycje literaturowe zazwyczaj kierowane są do menedżerów wyższego i średniego szczebla zarządzania, wydaje się, że w opisie metod należałoby uwzględnić definicje i twierdzenia matematyczne, z których wynikają, zwłaszcza wtedy gdy stosowane w metodzie twierdzenie lub definicja dotyczy przypadku szczególnego, odnosi się do zadanego przedziału lub zawiera ograniczenia. Niestety, pozycje literaturowe opisujące metody statystyczne zawierają zazwyczaj jedynie ogólny opis słowny lub prezentację na wybranych przykładach, z pominięciem przypadków szczególnych definicji i twierdzeń matematycznych.

Innym problemem, powodującym trudności w jednoznacznej klasyfikacji metod poziomu operacyjnego, jest zaliczanie ich do różnych grup. Na przykład autor pracy [77] zalicza metody teorii kolejek do grupy metod statystycznych, a autorka pracy [7] wyróżnia dodatkową grupę metod symulacyjnych. Dodatkowo u obu autorów, jak i w pracy [111], można znaleźć różne metody statystyczne oraz brak odniesienia do pozostałych metod z grupy statystycznych spotykanych w literaturze.

Najwłaściwszym sposobem podejścia w charakterystyce metod analizy i oceny ryzyka na poziomie operacyjnym wydaje się przedstawienie podstawowych miar statystycznych ryzyka, jak w pracach [103] i [111], a nie poszczególnych metod jego oceny, jak w pracach [7] i [77]. Jednak, z uwagi na ich występowanie w literaturze, poniżej zostaną zaprezentowane zarówno podstawowe miary statystyczne ryzyka jak i przedstawione na rysunku 5 metody statystyczne oraz metody badań operacyjnych. W celu wykazania przydatności tych metod w analizie i ocenie ryzyka w systemach produkcyjnych opisy metod zostaną zilustrowane przykładami. Ponieważ metody te powstały na gruncie statystyki matematycznej, w Załączniku 1 przedstawiono podstawowe charakterystyki zmiennych losowych.

Dodatkowo, w celu porównania metod poziomu operacyjnego z opracowaną w pracy metodyką analizy i oceny ryzyka, w rozdziale 8 rozwiązano przykład praktyczny za pomocą wybranej metody. Do celów porównawczych wybrano ten sam przykład, na którym dokonano weryfikacji opracowanej metodyki.

1.5 Statystyczne miary ryzyka

Za statystyczne miary ryzyka przyjmuje się miary dyspersji. Informują one o różnicach między wartościami (celem) uzyskanymi faktycznie a oczekiwanymi. Szczególnie w procesach produkcyjnych znany jest problem znacznego wpływu dyspersji na faktyczną wydajność systemów produkcyjnych [7]. Do miar dyspersji (ryzyka) najczęściej zalicza się [7, 77, 100, 102, 103, 111]:

- wariancję,
- semiwariancję,
- odchylenie standardowe,
- współczynnik zmienności,
- współczynnik asymetrii,

Wariancja

Wariancja zmiennych statystycznych ze zbioru danych $x_1, x_2, \dots, x_n$ ma postać średniej arytmetycznej kwadratów odchyłeń wartości cechy w zbiorze od ich średniej arytmetycznej, z tym zastrzeżeniem, że suma kwadratów odchyłeń od średniej jest dzielona nie przez n , jak przy obliczaniu średniej, lecz przez $n-1$. Wzór na wariancję przedstawia się następująco [50]:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (1.1)$$

lub w postaci wygodniejszej w obliczeniach [50]:

$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^n x_j^2 - n(\bar{x})^2}{n-1}, \quad (1.2)$$

gdzie $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna.

W przypadku zbioru danych pogrupowanych (szeregu rozdzielczego), odpowiednie wzory na wariancję przyjmą postać [50]:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i \text{ oraz} \quad (1.3)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 n_i - n(\bar{x})^2}{n-1}, \quad (1.4)$$

gdzie n_i - są liczebnościami rozkładu empirycznego.

Dla zmiennej losowej X wariancją nazywa się wyrażenie [50]:

$$D^2(X) = E[X - E(X)]^2 = \begin{cases} \sum_i [x_i - E(X)]^2 p_i & \text{dla zmiennej losowej skokowej,} \\ \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 f(x) dx & \text{dla zmiennej losowej ciągłej,} \end{cases} \quad (1.5)$$

Wariancja jest charakterystyką określającą stopień rozrzutu (zróznicowania) wartości cechy lub zmiennej losowej wokół wartości średniej lub oczekiwanej. Im większe zróznicowanie cechy lub zmiennej losowej w zbiorze, tym większe są odchylenia wartości od średniej arytmetycznej lub wartości oczekiwanej i większa wariancja [50]. Najmniejszą wartością, jaką może przyjąć wariancja, jest 0, co występuje wówczas, gdy wszystkie wartości cechy są jednakowe (zupełny brak zróznicowania). Wówczas nie ma niepewności co do ostatecznego wyniku, a więc decyzja nie będzie obciążona ryzykiem (wariancja jest równa 0, a więc i ryzyko równe jest 0). Stosuje się ją często przy obliczaniu spodziewanych zysków. Ze wzoru na wariancję wynika, że im większe odchylenia możliwych do osiągnięcia zysków od oczekiwanego (przeciętnego) zysku, tym większa wariancja, a tym samym większe ryzyko związane z podjęciem określonej decyzji.

Semiwariancja

W przypadku traktowania ryzyka jako efektu niepożądanego dla podejmującego decyzję (podejście niemieckie do ryzyka), w obliczeniach uwzględnia się jedynie ujemne odchylenia od wartości oczekiwanego zysku. W takim przypadku miarą ryzyka może być tzw. semiwariancja, określana według wzoru [48]:

$$D_s^2(X) = \sum_{i=1}^n p_i d_i^2, \quad (1.6)$$

gdzie d_i - ujemne odchylenia od wartości oczekiwanego zysku, która określana jest następująco:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{gdy } x_i \geq E(X) \\ x_i - E(X) & \text{gdy } x_i \leq E(X) \end{cases} \quad (1.7)$$

Odchylenie standardowe

Wariancja, jako charakterystyka pomiaru ryzyka, jest niezbyt wygodna z punktu widzenia interpretacji (mianem wariancji są kwadraty jednostek), dlatego wygodniej jest posługiwać się odchyleniem standardowym, które jest dodatnim pierwiastkiem kwadratowym z wariancji. Wzór na odchylenie standardowe dla cech statystycznych przedstawia się następująco [50]:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (1.8)$$

Dla zmiennej losowej X odchylenie standardowe przyjmuje postać:

$$D(X) = \sqrt{D^2(X)} \quad (1.9)$$

W analogiczny sposób, jak w przypadku semiwariancji, z przyczyn praktycznych prościej jest posługiwać się semiodchyleniem standardowym, które jest pierwiastkiem kwadratowym z semiwariancji, czyli:

$$D_s(X) = \sqrt{D_s^2(X)} \quad (1.10)$$

Współczynnik zmienności

Wariancja i odchylenie standardowe są miarami zróżnicowania absolutnego, tzn. mierzonego w jednostkach, w jakich mierzona jest dana cecha lub zmienna. W przypadku gdy należy porównać stopień zróżnicowania dwóch lub więcej rozkładów, lepiej jest posłużyć się współczynnikiem zmienności, będącym miarą zróżnicowania względnego [50]. Współczynnik zmienności to iloraz odchylenia standardowego i średniej w danym rozkładzie i wyraża się wzorem [50]:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (1.11)$$

Dla zmiennych losowych współczynnik zmienności przyjmuje postać [41]:

$$V = \frac{D(X)}{E(X)} \quad (1.12)$$

Współczynnik zmienności często stosowany jest do obliczania ryzyka wielkości produkcji lub sprzedaży.

Współczynnik asymetrii

W wielu sytuacjach istotny jest nie tylko przeciętny poziom i zróżnicowanie cechy (zmiennej losowej), ale także symetria rozkładu cechy (zmiennej losowej). Posłużyć do tego może miara zwana współczynnikiem asymetrii. Dla zmiennych empirycznych współczynnik asymetrii określa się wzorem [50]:

$$A = M'_3 / s^3, \quad (1.13)$$

gdzie M'_3 - tzw. trzeci moment centralny, definiowany jako średnia arytmetyczna trzecich potęg odchylen wartości cechy od jej średniej arytmetycznej [50]:

$$M'_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^3 \quad (1.14)$$

Dla zmiennych losowych współczynnik asymetrii przyjmuje postać [50]:

$$\gamma = \frac{\mu_3}{D^3(X)} \quad (1.15)$$

Jeśli $\gamma > 0$ to mówimy, że asymetria jest dodatnia (prawostronna), a jeśli $\gamma < 0$ to asymetrię nazywamy ujemną (lewostronną).

1.6 Statystyczne metody analizy i oceny ryzyka

Metody statystyczne mogą posłużyć do pozyskania, prezentacji i analizy danych na temat zakłóceń występujących w systemie produkcyjnym, co wynika z probabilistycznego charakteru zjawisk tam występujących [7]. Poniżej opisano i przedstawiono na przykładach metody statystyczne i metody badań operacyjnych przedstawione na rysunku 5. W celu uproszczenia opisu metod przyjęto, że zmienna losowa ma rozkład normalny.

Metoda analityczna

Metoda analityczna opisana w pracy [77] należy do metod opisu statystycznego. Sprowadza się do wyznaczenia liczbowych parametrów określających badany zbiór danych. W statystycznej analizie i ocenie ryzyka procesu produkcyjnego może mieć zastosowanie jedynie wówczas, gdy dysponuje się skończonym i pełnym zbiorem danych.

Punktem wyjścia w tej metodzie jest określenie empirycznego rozkładu cechy, czyli przyporządkowanie uszeregowanym rosnąco wartościom, przyjmowanym przez daną cechę, odpowiednio zdefiniowanych częstości ich występowania. i na tej podstawie sporządzenie wykresu częstości skumulowanych. W rezultacie otrzymuje się dystrybuantę empiryczną.

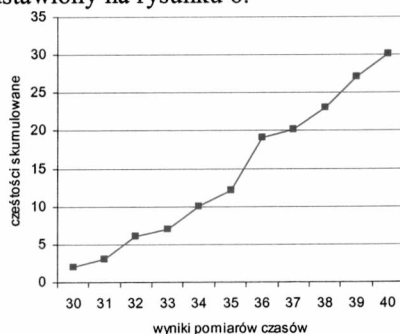
PRZYKŁAD 1. ZASTOSOWANIA METODY ANALITYCZNEJ

Wyniki obserwacji czasu trwania operacji montażu silników do pralek automatycznych przedstawia tabela 2. Jakie jest ryzyko, że czas montażu będzie większy niż przewidziany w technologii czas 37 min?

Tabela 2. Dane do przykładu 1 zastosowania metody analitycznej – czasy montażu silnika

Nr. Pomiaru	Czas [min.]	Nr. Pomiaru	Czas [min.]	Nr. Pomiaru	Czas [min.]	Nr. Pomiaru	Czas [min.]	Nr. Pomiaru	Czas [min.]
1.	31	7.	40	13.	33	19.	40	25.	39
2.	37	8.	36	14.	36	20.	32	26.	36
3.	36	9.	34	15.	39	21.	35	27.	30
4.	38	10.	32	16.	40	22.	36	28.	39
5.	35	11.	38	17.	38	23.	34	29.	39
6.	36	12.	32	18.	30	24.	34	30.	36

Zgodnie z postępowaniem w metodzie analitycznej na podstawie tabeli 2 sporządzany jest wykres częstości (liczebności) skumulowanych przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Częstości skumulowane dla czasów operacji montażu

Z wykresu można odczytać, że czas operacji montażu silnika mniejszy lub równy 37 min. wystąpił w badanym przypadku 20 razy na 30 analizowanych próbek. Dlatego można powiedzieć, że ryzyko czasu montażu większego od 37 min. wynosi 1/3.

Metoda analizy prawdopodobieństwa

Metoda ta znajduje zastosowanie w procesach inwestycyjnych. Służy do porównywania i wyboru przedsięwzięcia, które będzie charakteryzowało się wyższym poziomem osiągnięcia celu (np. zysku, wielkości sprzedaży, wielkości produkcji, itd.), jednak przy podejmowaniu decyzji o realizacji przedsięwzięcia pod uwagę brane jest również ryzyko [7, 77, 83]. Do analizy ryzyka stosuje się odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla rozpatrywanych przedsięwzięć. Etapy metody:

1. Wyznaczenie i porównanie wartości średnich lub oczekiwanych analizowanych przedsięwzięć, na podstawie wzoru z Załącznika 1 (Z.1.1) lub (Z.1.2).
2. Obliczenie wariancji ze wzoru (1.5) dla każdego z przedsięwzięć jako miary ryzyka, którym są one obciążone, a następnie odchylenia standardowego ze wzoru (1.9).
3. Porównanie stopni zróżnicowania rozkładów analizowanych przedsięwzięć przy pomocy współczynnika zmienności ze wzoru (1.12).
4. Opracowanie rozkładów prawdopodobieństwa, w ujęciu tabelarycznym lub graficznym, dla każdego z przedsięwzięć, przy wykorzystaniu wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego. Na podstawie zbudowanych rozkładów prawdopodobieństwa można ustalić, które z rozpatrywanych przedsięwzięć ma większe szanse osiągnięcia większego zysku, a więc obciążone jest mniejszym ryzykiem.

PRZYKŁAD 2. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY PRAWDOPODOBIEŃSTWA

Zakład „Alfa”, produkujący opakowania plastikowe, rozpatruje podpisanie umowy długoterminowej z producentem granulatu i chciałby aby ryzyko tej decyzji było jak najmniejsze. Ze względu na założone koszty produkcji pod uwagę brani są dwaj producenci – producent granulatu A i producent granulatu B. Granulat A jest znacznie tańszy, jednak do wyprodukowania partii wyrobów potrzeba go znacznie więcej. Decyzja zakładu „Alfa” zależeć będzie od kosztów surowca potrzebnego do wyprodukowania partii produkcyjnej i prawdopodobieństwa przejścia przez wyroby testu wytrzymałościowego. Tabela 3 przedstawia wyniki porównawcze obydwu ilości surowców zużytych do produkcji partii wyrobów oraz prawdopodobieństwo spełnienia przez wyrób norm wytrzymałościowych.

Tabela 3. Dane do przykładu 2 – porównanie danych wejściowych na temat producentów granulatu A i B

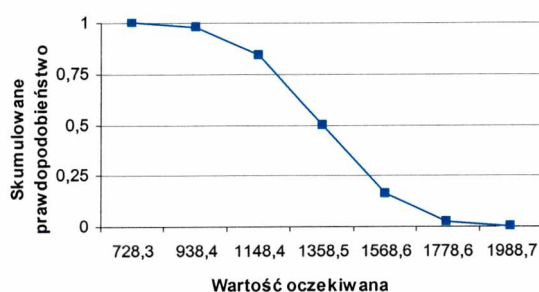
Producent granulatu A		Producent granulatu B	
Ilość zużytego surowca na partię [kg]	Prawdopodobieństwo pomyślnego przejścia testu wytrzymałościowego	Ilość zużytego surowca na partię [kg]	Prawdopodobieństwo pomyślnego przejścia testu wytrzymałościowego
1000	0,065	1050	0,045
1100	0,085	1120	0,07
1150	0,11	1100	0,25
1250	0,13	1260	0,18
1300	0,18	1350	0,15
1500	0,24	1450	0,13
1650	0,12	1610	0,11
1700	0,07	1780	0,065

Zgodnie z etapami metody dla obydwu producentów granulatu wyznaczone zostały wartości oczekiwane, wariancje oraz stopnie zróżnicowania rozkładów prawdopodobieństwa. Wyniki porównań przedstawia tabela 4

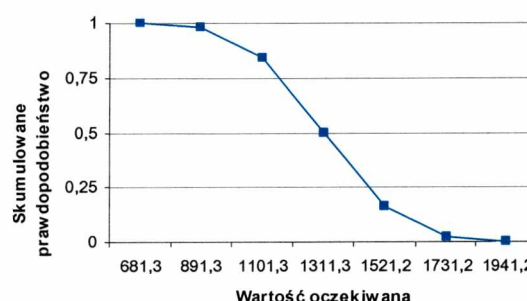
Tabela 4. Dane do przykładu 2 - wyniki porównań dla producenta granulatu A i B

Producent granulatu A			Producent granulatu B		
Wartość oczekiwana	Wariancja	Współczynnik zmienności	Wartość oczekiwana	Wariancja	Współczynnik zmienności
1358,5	44127,8	0,15	1311,3	44088,9	0,16

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 3 sporządzono wykresy przedstawiające rozkład prawdopodobieństwa wartości oczekiwanej ilości zużytego surowca dla producenta granulatu A (rysunek 7) i producenta granulatu B (rysunek 8).



Rys. 7. Rozkład prawdopodobieństwa wartości oczekiwanej dla producenta granulatu A



Rys. 8. Rozkład prawdopodobieństwa wartości oczekiwanej dla producenta granulatu B

Na podstawie zbudowanych rozkładów prawdopodobieństwa można ustalić dla którego z rozpatrywanych producentów istnieje większe ryzyko zużycia określonej ilości granulatu. Mniejsze ryzyko występuje w przypadku producenta granulatu B, gdyż prawdopodobieństwo dla danej wartości oczekiwanej jest mniejsze.

Metoda funkcji rozkładu normalnego

Stosując metodę funkcji rozkładu normalnego [77], można wyznaczyć prawdopodobieństwo (ryzyko) wystąpienia wartości badanej zmiennej, przy założeniu że zmienna ta ma rozkład normalny. Metoda sprowadza się do znalezienia wartości zmiennej standaryzowanej (U) przy danej wartości średniej m oraz odchyleniu standardowym σ . Ryzyko będzie wówczas równe polu pod krzywą na prawo od wartości (U). Etapy metody:

1. Obliczenie wartości zmiennej standaryzowanej (U) dla analizowanej zmiennej losowej według wzoru z Załącznika 1 (Z.1.11).
2. Odczytanie z tablic statystycznych dystrybuanty rozkładu normalnego wartość prawdopodobieństwa.
3. W przypadku gdy zmienna standaryzowana jest ujemna, należy skorzystać z własności funkcji gęstości zmiennej losowej o standardowym rozkładzie normalnym (Z.1.9) lub z własności dystrybuanty zmiennej losowej o standardowym rozkładzie normalnym (Z.1.10) przedstawionych w Załączniku 1.

PRZYKŁAD 3. ZASTOSOWANIA METODY FUNKCJI ROZKŁADU NORMALNEGO

Zakład planuje uruchomienie produkcji nowego wyrobu i w tym celu weryfikuje założenia technologiczne. W celu weryfikacji czasu operacji szepiania i spawania dokonano pomiarów czasów dla serii próbnej ustalając, że średni czas operacji wynosi 40 min., a odchylenie standardowe 5 min. Jakie jest ryzyko, że czas analizowanych operacji przekroczy 47 min?

Zgodnie ze wzorem z Załącznika 1 (Z.1.11) zmienna standaryzowana wynosi $U = \frac{47 - 40}{5} = 1,4$.

Wartość prawdopodobieństwa, odczytana z tablic statystycznych dystrybucyj rozkładu normalnego, wynosi 0,91. Zatem ryzyko, że czas operacji spawania i szepiania przekroczy 47 min. wynosi 0,09.

Metoda zmiennej standaryzowanej

Metoda zmiennej standaryzowanej jest analogiczna do metody funkcji rozkładu normalnego, a stosując ją można wyznaczyć prawdopodobieństwo (ryzyko), że wartość badanej zmiennej będzie zawierać się w założonym przedziale. Może być stosowana wówczas, gdy analizowana zmienna losowa ma rozkład normalny. Z punktu widzenia statystyki sformułowany problem sprowadza się do obliczenia prawdopodobieństwa, że zmienna standaryzowana U przyjmie wartość z danego przedziału ($a, b >$ przy znanej wartości średniej m i odchyleniu standardowym σ). Etapy metody:

1. Obliczenie wartości zmiennych standaryzowanych ze wzoru (Z.1.11) z Załącznika 1 dla skrajnych wartości przedziału ($a, b >$ i odczytanie ich wartości z tablic dystrybucyj standardowego rozkładu normalnego.
2. Obliczenie prawdopodobieństwa $P(a < X \leq b)$ zgodnie ze wzorem (Z.1.12).

PRZYKŁAD 4. ZASTOSOWANIA METODY ZMIENNEJ STANDARYZOWANEJ

Jakie jest ryzyko, że czas operacji szepiania i spawania z przykładu 3 ukształtuje się w przedziale 36 – 43 min?

Zmienna standaryzowana U_1 wynosi $U_1 = \frac{36 - 40}{5} = -0,8$.

Zmienna standaryzowana U_2 wynosi $U_2 = \frac{43 - 40}{5} = 0,6$.

Prawdopodobieństwo, że czas operacji ukształtuje się w danym przedziale wynosi 0,51, a zatem ryzyko wynoszące będzie 0,49.

Metoda Bayesa

Metoda ta opiera się na twierdzeniu Bayesa, zgodnie z którym dla dwóch zdarzeń zwanych „przyczyną” i „skutkiem”, można wyznaczyć prawdopodobieństwo wystąpienia przyczyny, kiedy znany jest już skutek [76]. Zastosować ją można np. do wyznaczenia ryzyka projektu nowego wyrobu lub wyboru lepszego wariantu decyzji. Cała metoda sprowadza się do przeprowadzenia analizy a posteriori, służącej podjęciu decyzji, której odpowiada największa oczekiwana korzyść. Analiza ta wykorzystuje dodatkową

informację do wyznaczenia prawdopodobieństw stanów natury s_j zgodnie z twierdzeniem Bayesa [50]:

$$OK_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} p(s_j|x), \quad i = 1, \dots, m, \quad (1.16)$$

gdzie:

- w_{ij} – korzyść związana z i -tą decyzją i j -tym stanem natury (s_j),
 p – prawdopodobieństwo a posteriori wystąpienia stanu natury s_j pod warunkiem uzyskania informacji x ,
 m – liczba stanów natury.

PRZYKŁAD 5. ZASTOSOWANIA METODY BAYESA [50]

Przedsiębiorstwo planuje wielkość produkcji wyrobu na podstawie wielkości popytu oraz danych sprzedaży z lat poprzednich. Stanami natury (s_j) są w tym wypadku możliwe wielkości popytu określone na poziomie 200, 300 i 500 sztuk wyrobu. Możliwymi decyzjami (a_j) odnośnie wielkości produkcji są wielkości 200, 400 i 600 sztuk wyrobu. Tabela 5 przedstawia korzyści związane z i -tą decyzją i j -tym stanem natury (s_j),

Tabela 5. Dane do przykładu 5 - możliwe korzyści związane z danym stanem natury [50]

Możliwe decyzje o wielkości produkcji (a_j) [sztuki]	Wielkości popytu (stany natury s_j) [sztuki]			
	s_1 : 200	s_2 : 300	s_3 : 400	s_4 : 500
a_1 : 200 wyrobów	400	400	400	400
a_2 : 400 wyrobów	0	600	1200	1200
a_3 : 600 wyrobów	-300	300	900	1500

Na podstawie doświadczenia z poprzednich lat oszacowano, że popyt na 200 wyrobów (stan s_1) wystąpi z prawdopodobieństwem $p_1=0,1$; stan s_2 wystąpi z prawdopodobieństwem $p_2=0,1$; stan s_3 wystąpi z prawdopodobieństwem $p_3=0,6$; stan s_4 wystąpi z prawdopodobieństwem $p_4=0,2$; Dodatkowo oszacowano prawdopodobieństwa warunkowe $p(x_i|s_j)$ przedstawione w tabeli 6.

Tabela 6. Dane do przykładu 5 - prawdopodobieństwa warunkowe

Wyniki z próby	Stany natury			
	s_1	s_2	s_3	s_4
x_1	0,70	0,10	0,05	0,01
x_2	0,15	0,80	0,10	0,04
x_3	0,10	0,07	0,75	0,05
x_4	0,05	0,03	0,10	0,90
Razem	1,00	1,00	1,00	1,00

Na podstawie wzoru (1.16) obliczono oczekiwane korzyści (OK_i), które przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Oczekiwane korzyści a posteriori

Decyzja	Informacja z próby			
	x_1	x_2	x_3	x_4
a_1	400	400	400	400
a_2	396,6	795	1165,8	1233,6
a_3	107,4	524,4	878,4	1304,4

Z tabeli 7 wynika, że przy wystąpieniu informacji że wystąpi popyt na 200 sztuk wyrobu należy podjąć decyzję a_1 (ponieważ jest ona obciążona najmniejszym ryzykiem), podobnie, jeśli wystąpi popyt na 400 sztuk wyrobu należy podjąć decyzję a_2 , itd.

Metoda analizy odchylenia standardowego (FI)

Analiza odchylenia standardowego znajduje zastosowanie w ocenie ryzyka z uwagi na to, że odchylenie standardowe jest jedną z podstawowych miar dyspersji. Na podstawie tej metody można ustalić poziom zmiennej w zadanym przedziale (x_1, x_2) , przy założonym poziomie prawdopodobieństwa. W tym celu oblicza się [7, 76, 77]:

1. wartość średnią m zmiennej losowej,
2. odchylenie standardowe σ ,
3. wartości zmiennych standaryzowanych na granicach przedziału (x_1, x_2) według wzoru z Załącznika 1 (Z.1.11),
4. Φ według wzoru [7]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1.17)$$

5. Prawdopodobieństwo kształtowania się zmiennej losowej w zadanym przedziale (x_1, x_2) wynosi [7]:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{x_2 - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - m}{\sigma}\right) \right] \quad (1.18)$$

PRZYKŁAD 6. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY ODCHYLENIA STANDARDOWEGO (FI)

Przedsiębiorstwo produkcyjne analizuje jakość swoich wyrobów. Wyniki kontroli jakości 10-ciu kolejnych partii produkcyjnych przedstawia tabela 8. Jakie jest ryzyko wystąpienia od 5 do 7 braków w partii wyrobów?

Tabela 8. Dane do przykładu 6 - wyniki kontroli jakości 10-ciu partii produkcyjnych

Numer partii	Liczba braków	Numer partii	Liczba braków
1	3	6	2
2	9	7	11
3	5	8	8
4	6	9	4
5	7	10	3

Na podstawie danych z tabeli 8 obliczono:

- wartość średnią: 5,8;
- odchylenie standardowe: 2,79;
- wartości zmiennych standaryzowanych na granicy przedziału (5,7):

$$U_1 = \frac{5 - 5,8}{2,79} = -0,29,$$

$$U_2 = \frac{7 - 5,8}{2,79} = 0,43;$$

- prawdopodobieństwo wystąpienia od 5 do 7 braków w kontrolowanej partii produkcyjnej wynosi 0,14.

Zatem ryzyko wystąpienia od 5 do 7 braków w partii produkcyjnej wynosi 0,86.

Metoda analizy przyrostów

Metoda analizy przyrostów służy do rozwiązywania problemów decyzyjnych. Kryterium decyzyjnym jest w tym przypadku maksymalizacja wartości oczekiwanej zysku. W metodzie nie jest wymagana budowa pełnych tablic korzyści, tj. tablic przypisujących każdej kombinacji decyzji i rezultatów (konsekwencji decyzji) odpowiednich wartości zysku. Tworzona jest natomiast funkcja, mająca zazwyczaj jedno maksimum, która wyznacza wartość oczekiwaną zysku. Wybór konkretnej decyzji to znalezienie argumentu, dla którego funkcja osiąga maksimum.

PRZYKŁAD 7. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY PRZYROSTÓW [76]

Pewien niewielki zakład produkcyjny otrzymał zamówienie na wykonanie pięciu sztuk specjalnych bardzo precyzyjnych narzędzi. Zamówienie ma być realizowane z pomocą automatycznie sterowanych maszyn, których obsługa ogranicza się do umieszczenia odpowiedniego kawałka metalu w uchwycie oraz wybrania odpowiedniego programu obróbki. Jednostkowe koszty surowca i obróbki wynoszą 40 pln. Wartość złomu uzyskanego za egzemplarz wadliwy wynosi 15 pln. Koszty związane z dodatkową zmianą roboczą, niezbędną w przypadku wyprodukowania nie wystarczającej liczby prawidłowo wykonanych egzemplarzy wynoszą 200 pln. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej x , oznaczającej liczbę wyprodukowanych egzemplarzy, która jest niezbędna do otrzymania pięciu egzemplarzy wykonanych prawidłowo, przyjmuje następujące wartości:

$$f(5)=0,510 \quad f(6)=0,310 \quad f(7)=0,112 \quad f(8)=0,040 \quad f(9)=0,020 \quad f(10)=0,008$$

Ile sztuk narzędzi należy wyprodukować, aby wartość oczekiwana zysku była jak największa (ryzyko poniesienia straty było jak najmniejsze)?

Koszty stałe produkcji $T=200$,
jednostkowy koszt produkcji $C=40$,
koszt złomowania dodatkowego dobrego wyrobu $R=15$.

Optymalną wielkością zaplanowanej produkcji (obarczoną najmniejszym ryzykiem) jest najmniejsze i , takie że:

$$\Phi = \frac{f(i+1)}{F(i)} \leq \frac{C-R}{T}, \text{ gdzie } F(i) = \sum_{j=i}^n f(j)$$

Z powyższych danych wynika że:

$i=5$	$F(5)=0,510$	$f(6)=0,310$	$\Phi = 0,61$
$i=6$	$F(6)=0,820$	$f(7)=0,112$	$\Phi = 0,14$
$i=7$	$F(7)=0,932$	$f(8)=0,040$	$\Phi = 0,04$

W ostatnim wierszu po raz pierwszy wartość Φ jest mniejsza od 0,125, a więc Φ spełnia warunek dla $i=7$. Wobec tego, aby ryzyko poniesienia straty było najmniejsze, należy zaplanować produkcję siedmiu sztuk wyrobu.

Metoda analizy histogramów częstości

Metoda ta jest metodą graficzną i polega na sporządzeniu histogramów częstości, których ukształtowanie może być źródłem informacji o przebiegu procesu produkcyjnego. Histogramy o nieregularnych kształtach, w których wyraźnie występuje kilka maksimum, dają podstawy do podejrzeń o istnieniu znacznych zakłóceń produkcyjnych. Na podstawie

analizy kształtów histogramów można również wnioskować o typie rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej. Przyjęcie poprawnego rozkładu prawdopodobieństwa gwarantuje poprawne szacowanie parametrów zmiennej losowej, co podnosi trafność przewidywań i zmniejsza ryzyko podejmowanych decyzji.

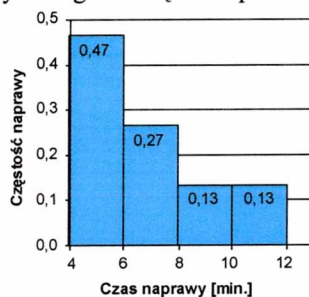
PRZYKŁAD 8. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY HISTOGRAMÓW CZĘSTOŚCI

W jednym z zakładów produkcyjnych analizowano dane na temat czasów naprawy braków. Zebrane dane przedstawiono w tabeli 9. Jakie jest ryzyko, że czas naprawy braku wynosi powyżej 8 min?

Tabela 9. Dane do przykładu 8 - czasy naprawy braków

Nr braku	Czas naprawy braku [min.]	Nr braku	Czas naprawy braku [min.]	Nr braku	Czas naprawy braku [min.]
1	5	6	6	11	7
2	7	7	4	12	5
3	4	8	10	13	8
4	8	9	5	14	7
5	9	10	6	15	6

Na tej podstawie zbudowano następujący histogram częstości przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Histogram częstości

Na podstawie analizy histogramu częstości można stwierdzić, że ryzyko naprawy trwającej powyżej 8 min. wynosi 0,26.

Metoda analizy korelacji

Przy pomocy metody analizy korelacji można określić związek między zmiennymi oraz siłę zależności pomiędzy nimi. Analizę tę można stosować do określania zależności czynników produkcji oraz jej parametrów [7]. Metoda znajduje zastosowanie w analizie ryzyka z uwagi fakt iż jego minimalizacja jest w ścisłej zależności np. z trafnością oszacowania nakładów czynników produkcji. Korelację charakteryzuje współczynnik korelacji, który np. w rozkładzie empirycznym zmiennych X i Y określany jest wzorem [50]:

$$r = \frac{c_{xy}}{s_x s_y}, \quad (1.19)$$

gdzie c_{xy} - jest kowariancją w dwuwymiarowym rozkładzie empirycznym, natomiast s_x oraz s_y są odchyleniami standardowymi w empirycznych rozkładach brzegowych odpowiednio zmiennej X i Y .

Kształtowanie się wartości zmiennej losowej pod wpływem innej zmiennej, w sposób analityczny opisuje tzw. model regresji. Głównym jego składnikiem jest funkcja regresji, której postać analityczną określa się na podstawie wyników próby losowej. Parametry tej funkcji podlegają estymacji opartej na próbie losowej za pomocą procedur ustalonych w teorii korelacji i regresji. Istnieje wiele szczegółowych algorytmów obliczania współczynników korelacji i regresji. Dlatego w pracy ich nie zamieszczono. W Załączniku 1 przedstawiono podstawowe cechy współczynnika korelacji oraz klasyczny model regresji liniowej.

PRZYKŁAD 9. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY KORELACJI [50]

W pewnym zakładzie przemysłowym dokonano 10 pomiarów zużycia wody przy produkcji wyrobu (X – wielkość produkcji w tys. sztuk, Y – zużycie wody w m³). Jakie jest ryzyko wzrostu zużycia wody w produkcji wyrobu przy założeniu, że dla opisu zależności zużycia wody względem wielkości produkcji właściwy jest klasyczny model regresji liniowej?

Zadanie to, z punktu widzenia statystyki matematycznej, sprowadza się do znalezienia parametrów α i β , będącymi parametrami wykresu regresji liniowej (porównaj załącznik 1). W celu wyznaczenia ocen tych parametrów oblicza się wartości ich estymatorów $\hat{\alpha}$ i $\hat{\beta}$. Tabela 10 przedstawia dane z pomiarów oraz obliczenia potrzebne do wyznaczenia estymatorów.

Tabela 10. Dane do przykładu 9 – pomiary zużycia wody

i	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
1	1	8	8	1
2	2	15	30	4
3	3	8	24	9
4	4	10	40	16
5	5	22	110	25
6	6	14	84	36
7	7	17	119	49
8	8	28	224	64
9	9	22	198	81
10	10	26	260	100
Σ	55	170	1079	385

Podstawiając dane z tabeli 10 do wzorów (Z.1.22) i (Z.1.23) z Załącznika 1 otrzymujemy:

$$\hat{\alpha} = \frac{1079 - 55 \cdot 170 / 10}{385 - 55^2 / 10} \cong 1,96 \quad \text{oraz} \quad \hat{\beta} = \frac{1}{10} 170 - 1,96 \cong 5,22$$

Tak więc wyznaczona z próby liniowa funkcja regresji zużycia wody względem wielkości produkcji ma postać $\hat{y} = 1,96x + 5,22$. Współczynnik regresji otrzymany z próby, $\hat{\alpha} = 1,96$ można interpretować jako przeciętny przyrost zużycia wody w tys. m³ związany z przyrostem produkcji o jednostkę (tysiąc sztuk). Współczynnik ten można traktować jako ryzyko zwiększenia zużycia wody przy wzroście produkcji.

Metoda analizy wrażliwości

Metoda ta opisana została w pracach [7, 83] i służy do badania wpływu zmian wartości jednej zmiennej (wejściowej) na wartość innej zmiennej (wyjściowej) pozostającej z nią w funkcyjnej zależności. Za jej pomocą można znaleźć czynniki mające największe znaczenie dla danego przedsięwzięcia.

Jednak zaliczenie tej metody przez autorów do grupy metod statystycznych budzi wątpliwości. Wskaźnik wrażliwości można określić za pomocą wzoru [7]:

$$W_w = \frac{\frac{\Delta W_{WY}}{W_{WY}}}{\frac{\Delta W_{WE}}{W_{WE}}}, \quad (1.20)$$

w którym:

W_{WY} - zmienna wyjściowa,

W_{WE} - zmienna wejściowa,

Δ - przyrost wartości zmiennej.

PRZYKŁAD 10. ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY WRAŻLIWOŚCI

Przedsiębiorstwo produkcyjne zamierza sprawdzić, czy istnieje ryzyko uzyskania mniejszej od założonej wielkości produkcji spowodowane zbyt małą liczbą pracowników. Obecnie przy produkcji zatrudnionych jest pięciu pracowników, a produkowanych wyrobów jest średnio 13 sztuk tygodniowo. Wyniki uzyskano przy pomocy metody eksperymentalnej i na ich podstawie wyznaczono wskaźnik wrażliwości W_w (tabela 11)

Tabela 11. Dane do przykładu 10 - liczba pracowników i uzyskana wielkość produkcji.

Liczba pracowników	Liczba wyprodukowanych sztuk/ tydzień	Wskaźnik wrażliwości W_w
6	15	0,8
7	17	0,8
9	22	0,9
10	23	0,8
11	24,5	0,7

Przeprowadzona analiza wrażliwości wskazuje, że najwyższy wzrost wskaźnika wrażliwości W_w uzyskuje się przy zatrudnieniu dziewięciu pracowników. Na tej podstawie można stwierdzić, że liczba pracowników produkcyjnych jest czynnikiem ryzyka wpływającym znacząco na wielkość produkcji.

Metoda testu dla wartości średniej populacji

Z punktu widzenia statystyki matematycznej metoda ta sprowadza się do weryfikacji hipotez statystycznych z próby losowej. Metodę tę stosuje się wówczas, gdy sformułowane są pewne sądy o rozkładzie populacji, które należy zweryfikować w oparciu o wyniki z próby losowej. Weryfikacja ta przeprowadzana jest przy założonym poziomie istotności α , który określa krytyczną wartość prawdopodobieństwa. Jeżeli otrzymane prawdopodobieństwo jest większe od założonego poziomu istotności α , to istnieją podstawy do przyjęcia hipotezy zerowej. W przeciwnym wypadku hipotezę zerową odrzuca się na rzecz hipotezy alternatywnej.

Testów dla wyznaczania wartości średniej populacji jest kilka. Stosuje się je w zależności od znajomości rozkładu populacji generalnej lub parametrów tego rozkładu. W przypadku, gdy populacja generalna ma rozkład normalny z nieznaną wartością średnią m oraz znanym odchyleniem standardowym σ to stosuje się statystykę o postaci:

$$U = \frac{\bar{x} - m_0}{\sigma} \sqrt{n} , \quad (1.21)$$

gdzie:

$\bar{x}$ - średnia z próby,

n – liczebność próby,

W kolejnym kroku należy obliczyć wartość krytyczną u_α określającą obszar krytyczny Q , gdzie [41]:

$$Q = \{U : |U| \geq u_\alpha\} \quad (1.22)$$

Stosowanie testu istotności z tak zbudowanym obszarem krytycznym Q sprowadza się do obliczenia z wyników konkretnej próby wartości statystyki U i sprawdzenia, czy znajduje się ona w obszarze krytycznym Q . Jeśli $|u| \geq u_\alpha$ to hipotezę zerową należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej, w przeciwnym przypadku nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej przy założonym poziomie istotności α .

PRZYKŁAD 11. ZASTOSOWANIA METODY TESTU DLA WARTOŚCI ŚREDNIEJ POPULACJI [50]

Czas montowania elementu T w automatycznej pralce bębnowej jest zmienną losową o rozkładzie normalnym. Norma techniczna przewiduje na tę czynność 6 min., natomiast wśród jej wykonawców istnieje pogląd, że ten normatywny czas jest zbyt krótki i powoduje ryzyko przekroczenia czasu produkcji. Należy sprawdzić to przypuszczenie przy założeniu, że odchylenie standardowe czasu montowania wynosi $\sigma = 1 \text{ min. } 30 \text{ s}$.

Zmierzono, że w grupie 25 robotników średni czas montowania wynosi $\bar{x} = 6 \text{ min. } 20 \text{ s}$. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$. Formalnie, weryfikowaną hipotezą zerową jest w tym przypadku: $H_0 : m = 6$.

Wartość tej statystyki, zgodnie ze wzorem (1.22), wynosi:

$$U = \frac{6,33 - 6}{1,5} \sqrt{25} = 1,1$$

Odczytując z tablic wartość dystrybuanty rozkładu normalnego $N(0,1)$ można stwierdzić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, gdyż wartość U znalazła się poza obszarem krytycznym Q . Oznacza to, że wyniki z próby nie potwierdziły przypuszczenia, że norma jest nieodpowiednia i nie powoduje ryzyka przekroczenia czasu produkcji. Różnica między średnim czasem montowania otrzymanym w próbie a średnim czasem określonym przez normę nie jest statystycznie istotna, tzn. może być przypadkowa.

1.7 Metody badań operacyjnych analizy i oceny ryzyka

Badania operacyjne to nazwa dyscypliny naukowej, która zrodziła się w okresie drugiej wojny światowej. Jej zdobycze, po zakończeniu wojny, zostały zastosowane w praktyce ekonomicznej na najniższym szczeblu zarządzania gospodarką (w mikroskali) [68]. W praktyce zarządzania badania operacyjne umożliwiają budowę modeli, w oparciu o które możliwe jest podejmowanie efektywnych decyzji ze względu na przyjęte kryteria techniczne, ekonomiczne, organizacyjne i społeczne [42]. Modele te budowane są na podstawie identyfikacji sytuacji rzeczywistych opisywanych charakterystycznymi wielkościami i parametrami. W ocenie ryzyka produkcyjnego znajdują zastosowanie wybrane metody badań operacyjnych (porównaj z rysunkiem 5), służące do rozwiązania konkretnych sytuacji decyzyjnych, w celu podjęcia decyzji optymalnej [83].

Algorytm simpleks

Algorytm simpleks jest uniwersalną metodą rozwiązywania programów liniowych, czyli takich problemów decyzyjnych, w których zarówno warunki ograniczające, jak i funkcja celu są funkcjami liniowymi. Istota tego algorytmu polega na badaniu kolejnych rozwiązań bazowych programu liniowego o postaci kanonicznej w taki sposób, że:

- a) znajdujemy (dowolne) rozwiązanie bazowe programu,
- b) sprawdzamy, czy jest ono optymalne,
- c) jeżeli dane rozwiązanie nie jest optymalne, znajdujemy następne rozwiązanie bazowe, lepsze lub nie gorsze od poprzedniego.

Algorytm simpleks jest więc procedurą etapową. W każdym z etapów wyznacza się rozwiązanie bazowe i sprawdza, czy można je jeszcze poprawić. Postępowanie kończy się w momencie stwierdzenia, że aktualnego rozwiązania bazowego nie można już poprawić, czyli jest ono optymalne. W praktyce algorytm ten często stosuje się przy wyborze wariantów programu produkcji.

PRZYKŁAD 12. ZASTOSOWANIA ALGORYTMU SIMPLEKS [68]

Przedsiębiorstwo produkuje dwa wyroby W_1 i W_2 . Ograniczeniem w procesie produkcji są zapasy trzech surowców: S_1 , S_2 , S_3 . W tabeli 12 podano jednostkowe nakłady surowców na produkcję wyrobów, zapasy surowców oraz ceny wyrobów. Jakie są optymalne rozmiary produkcji wyrobów W_1 i W_2 , które gwarantują maksymalny przychód z ich sprzedaży przy istniejących zapasach surowców?

Tabela 12. Dane do przykładu 12 – nakłady surowców na produkcję wyrobów oraz ich zapasy [68]

Surowce	Zużycie surowca na 1 szt. wyrobu [kg]		Zapasy surowca [kg]
	W_1	W_2	
S_1	2	1	1000
S_2	3	3	2400
S_3	1,5	-	600
Cena [zł]	30	20	

W modelu matematycznym opisującym przedstawioną sytuację decyzyjną występują dwie zmienne decyzyjne: x_1 oznacza wielkość produkcji W_1 i x_2 oznacza wielkość produkcji W_2 . Model jest następujący:

$$\begin{aligned} (1) \quad & 30x_1 + 20x_2 \rightarrow \max, \\ (2) \quad & 2x_1 + x_2 \leq 1000, \\ (3) \quad & 3x_1 + 3x_2 \leq 2400, \\ (4) \quad & 1,5x_1 \leq 600, \\ (5) \quad & x_1, x_2 \geq 0, \end{aligned}$$

Rozwiązanie przykładu przy pomocy algorytmu sympleks rozpoczyna się od sprowadzenia zadania do postaci kanonicznej poprzez dodanie do lewych stron nierówności zmiennych swobodnych: x_3, x_4 i x_5 . A zatem:

$$\begin{aligned} 30x_1 + 20x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 & \rightarrow \max, \\ 2x_1 + x_2 + x_3 & = 1000, \\ 3x_1 + 3x_2 + x_4 & = 2400, \\ 1,5x_1 + x_5 & = 600, \end{aligned}$$

Należy zauważyć, że zmienną swobodną x_3 można interpretować jako nie wykorzystany zasób surowca S_1 , zmienną x_4 - jako nie wykorzystany zasób surowca S_2 i zmienną x_5 - jako nie wykorzystany zasób surowca S_3 . Tablica sympleksowa, dla początkowego rozwiązania bazowego, ma zatem postać przedstawioną w tabeli 13

Tabela 13. Dane do przykładu 12 - I tablica sympleksowa do przykładu 11 [68]

c_b	c_j	30	20	0	0	0	Rozwiązanie (b_i)
	Zmienne bazowe	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
0	x_3	2	1	1	0	0	1000
0	x_4	3	3	0	1	0	2400
0	x_5	1,5	0	0	0	1	600
	z_j	0	0	0	0	0	0
	$c_j - z_j$	30	20	0	0	0	

Stosując kolejne kroki algorytmu sympleks otrzymuje się kolejne tablice sympleksowe. Ostatnią tablicą sympleksową jest tablica przedstawiona w tabeli 14.

Tabela 14. Dane do przykładu 12 - IV (ostatnia) tablica sympleksowa do przykładu 12 [68]

c_b	c_j	30	20	0	0	0	Rozwiązanie (b_i)
	Zmienne bazowe	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
20	x_2	0	1	-1	2/3	0	600
0	x_5	0	0	-1,5	0,5	1	300
30	x_1	1	0	1	-1/3	0	200
	z_j	30	20	10	10/3	0	18 000
	$c_j - z_j$	0	0	-10	-10/3	0	

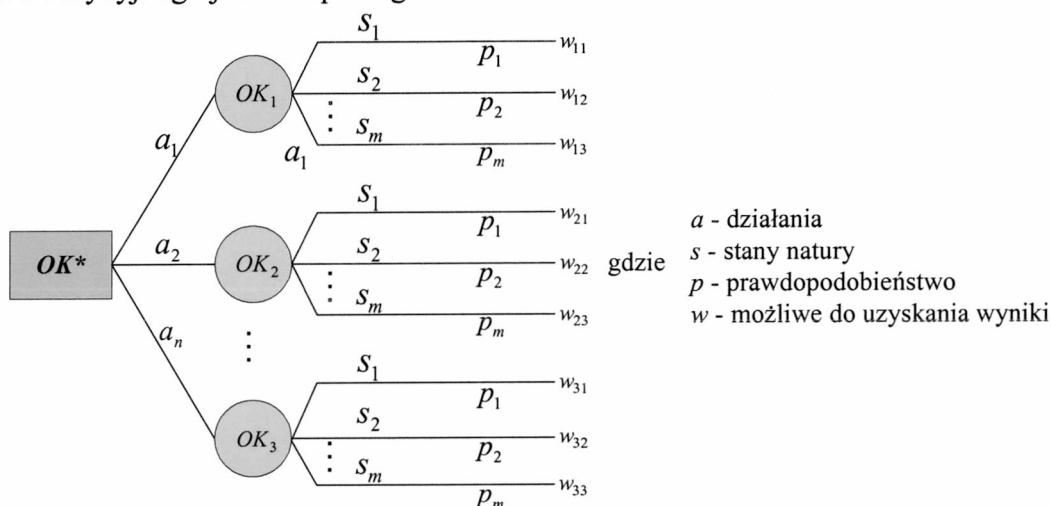
W analizowanym przykładzie w kolejnych iteracjach wartość funkcji celu wzrasta od 0 w iteracji I do 18 000 w ostatniej. Zatem reasumując, optymalne rozwiązanie zadania to:

$$x_b = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_5 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 600 \\ 300 \\ 2000 \end{bmatrix}$$

Przy takim rozwiązaniu pozostaje niewykorzystany zasób surowca S_2 w ilości 300 kg.

Metoda drzewa decyzyjnego

Metoda drzewa decyzyjnego jest techniką prezentacji problemu decyzyjnego, ułatwiającą równocześnie śledzenie kolejnych kroków w rozwiązywaniu problemu decyzyjnego. Drzewo decyzyjne stanowi graficzną prezentację wszystkich elementów problemu decyzyjnego: dopuszczalnych decyzji, stanów natury i ich prawdopodobieństw oraz możliwych korzyści lub strat możliwości [50]. Rysunek przedstawia ogólną postać drzewa decyzyjnego jednoetapowego.



Rys. 10. Schemat drzewa decyzyjnego

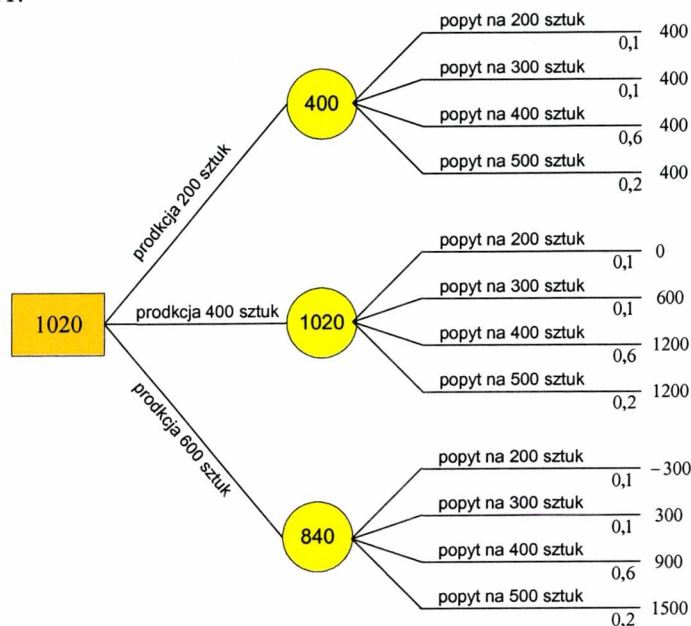
Drzewo decyzyjne składa się z dwóch rodzajów węzłów (decyzyjnych i losowych) oraz gałęzi (ścieżek). Węzły decyzyjne oznaczone są kwadratami i sygnalizują, że w danym momencie procesu podejmowania decyzji musi zostać podjęta decyzja. Ścieżki, które wychodzą z węzła decyzyjnego, reprezentują różne możliwe warianty decyzyjne. Węzły losowe oznaczone są kółkami, z których wychodzą gałęzie reprezentujące stany natury. Informują o tym, że w danym momencie procesu decyzyjnego dalszy przebieg zdarzeń jest wyznaczony z określonym prawdopodobieństwem przez czynniki zewnętrzne, nie zaś przez podejmującego decyzję.

Dysponując informacją o wysokości korzyści związanych z każdym stanem natury i każdą decyzją, można, przesuwając się od prawej do lewej strony drzewa decyzyjnego, wyznaczyć oczekiwane korzyści dla każdego wariantu i zapisać je nad węzłami losowymi drzewa odpowiadającymi poszczególnym wariantom. Za optymalną decyzję uznaje się tę, której odpowiada najwyższa oczekiwana korzyść. Wielkość tej korzyści zapisana jest na ogół nad węzłem decyzyjnym.

Metoda ta zaliczana jest do metod analizy i oceny ryzyka, gdyż pozwala podejmującemu decyzję poznać strukturę problemu decyzyjnego (zwłaszcza wtedy, kiedy problem jest bardziej skomplikowany).

PRZYKŁAD 13. ZASTOSOWANIA DRZEWA DECYZYJNEGO

Do przedstawienia metody drzewa decyzyjnego zostaną wykorzystane dane z PRZYKŁADU 5 przedstawione w tabeli 5 oraz prawdopodobieństwa wielkości popytu. Drzewo decyzyjne dla tego przypadku przedstawia rysunek 11.

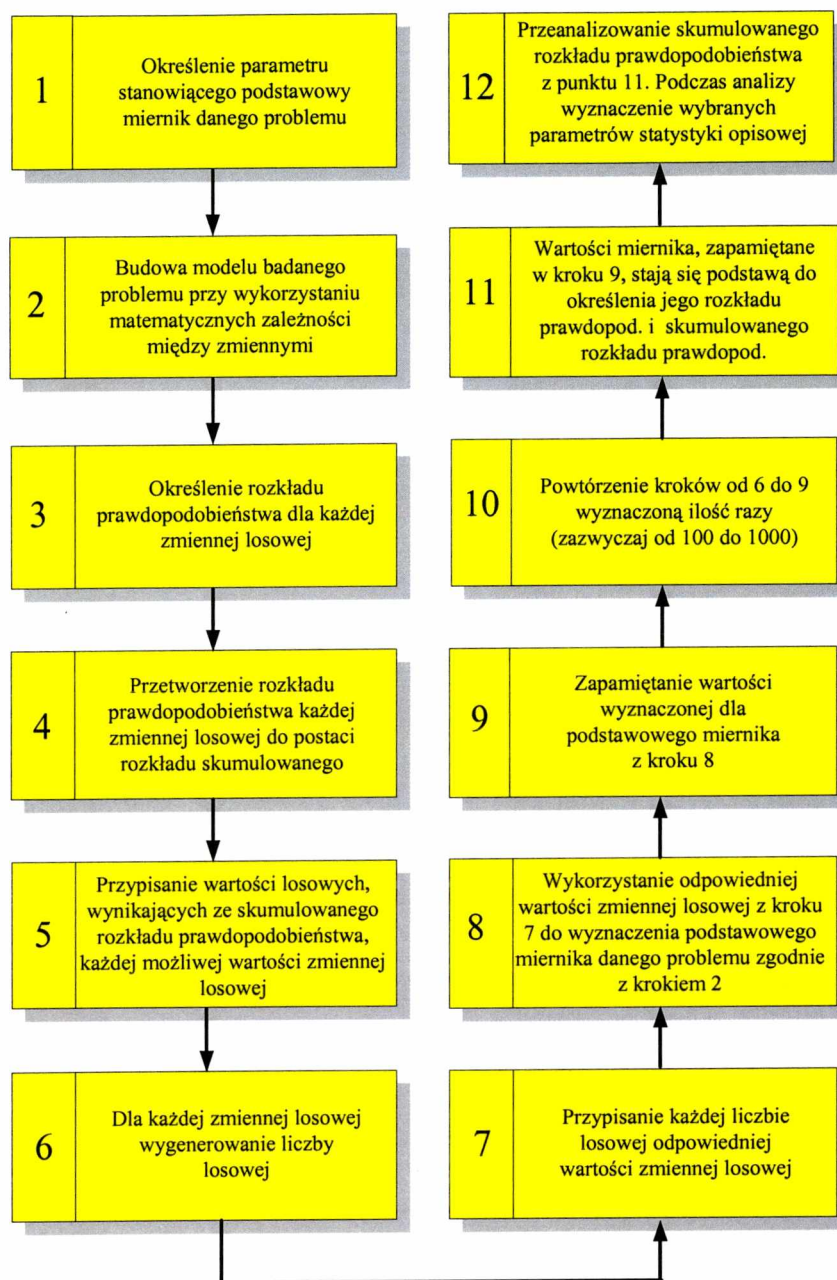


Rys. 11. Drzewo decyzyjne dla przykładu 13.

Z interpretacji drzewa decyzyjnego wynika, że najlepszą decyzją (minimalizującą ryzyko poniesienia straty) jest produkcja 400 sztuk wyrobu. Przy tej decyzji spodziewany zysk wynosi 1020.

Metoda symulacyjna Monte Carlo

Symulacja z wykorzystaniem metody symulacyjnej Monte Carlo nazywana jest również symulacją stochastyczną. Służy ona do badań właściwości modelu lub jego fragmentów (parametrów, zmiennych, ograniczeń) stanowiących źródło niepewności. Do modelu wstawiane są zaburzenia wylosowane z odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa, a następnie wyznaczane jest rozwiązanie modelu. Operacja ta powtarzana jest n -krotnie. Metoda znajduje zastosowanie w analizie ryzyka z uwagi na możliwość oceny skutków podejmowanych decyzji, poprzez zbadanie wpływu wielu zmiennych wejściowych na wielkości szacowanych parametrów. W odróżnieniu od analizy wrażliwości, w której zmienne rozpatruje się oddzielnie, w analizie symulacyjnej zmienne niepewne rozpatruje się razem, przy uwzględnieniu związków występujących między nimi [83]. Sposób postępowania w metodzie Monte Carlo, z uwagi na dużą liczbę etapów metody, przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Etapy i sposób postępowania w metodzie Monte Carlo [76]

Do zalet tej metody należą [38, 78]:

- możliwość operowania dużym zbiorem danych,
- zdolność do wyznaczania logicznej struktury modeli oraz dokonywanie na nich operacji matematycznych,
- konieczność odpowiedniego przystosowania postaci modelu oraz przygotowania przebiegu symulacji jako integralnej części badania.

PRZYKŁAD 14. ZASTOSOWANIA METODY MONTE CARLO [77]

W firmie zbadano wpływy i wydatki dotyczące produkcji jednego wyrobu i zanotowano, że:

- Średnie wpływy 9000zł
- Średnie wydatki 8000zł

Analitycy ustalili, że wydatki kształtują się według rozkładu normalnego z odchyleniem standardowym równym 1000zł, natomiast wpływy kształtują się według rozkładu normalnego z odchyleniem standardowym równym 1100zł. Kierownictwo firmy podjęło decyzję, że zaniecha produkcji, jeśli nadwyżka wpływów nad wydatkami będzie mniejsza niż 70%, gdyż wiąże się to z ryzykiem poniesienia straty.

Tabela 15. Dane do przykładu 14 - wygenerowane losowo wartości wpływów i wydatków [77]

Liczby losowe wpływów	Liczby losowe wydatków
10055	7201
5418	7963
9728	8013
8198	5342
9909	8694
9878	8271
8306	9125
8821	8455
8534	8714
9503	9192

Tabela 16. Dane do przykładu 14 - wyniki finansowe dla ustalonych liczb losowych [77]

Lp.	Liczby losowe wpływów	Liczby losowe wydatków	Wynik finansowy	Lp.	Liczby losowe wpływów	Liczby losowe wydatków	Wynik finansowy	Lp.	Liczby losowe wpływów	Liczby losowe wydatków	Wynik finansowy
1	10055	7201	2854	34	8198	5342	2856	67	8306	9125	-819
2	10055	7963	2092	35	8198	8694	-496	68	8306	8455	-149
3	10055	8013	2042	36	8198	8271	-73	69	8306	8714	-408
4	10055	5342	4713	37	8198	9125	-927	70	8306	9192	-886
5	10055	8694	1361	38	8198	8455	-257	71	8821	7201	1620
6	10055	8271	1784	39	8198	8714	-516	72	8821	7963	858
7	10055	9125	930	40	8198	9192	-994	73	8821	8013	808
8	10055	8455	1600	41	9909	7201	2708	74	8821	5342	3479
9	10055	8714	1341	42	9909	7963	1946	75	8821	8694	127
10	10055	9192	863	43	9909	8013	1896	76	8821	8271	550
11	5418	7201	-1783	44	9909	5342	4567	77	8821	9125	-304
12	5418	7963	-2545	45	9909	8694	1215	78	8821	8455	366
13	5418	8013	-2595	46	9909	8271	1638	79	8821	8714	107
14	5418	5342	76	47	9909	9125	784	80	8821	9192	-371
15	5418	8694	-3276	48	9909	8455	1454	81	8534	7201	1333
16	5418	8271	-2853	49	9909	8714	1195	82	8534	7963	571
17	5418	9125	-3707	50	9909	9192	717	83	8534	8013	521
18	5418	8455	-3037	51	9878	7201	2677	84	8534	5342	3192
19	5418	8714	-3296	52	9878	7963	1915	85	8534	8694	-160
20	5418	9192	-3774	53	9878	8013	1865	86	8534	8271	263
21	9728	7201	2527	54	9878	5342	4536	87	8534	9125	-591
22	9728	7963	1765	55	9878	8694	1184	88	8534	8455	79
23	9728	8013	1715	56	9878	8271	1607	89	8534	8714	-180
24	9728	5342	4386	57	9878	9125	753	90	8534	9192	-658
25	9728	8694	1034	58	9878	8455	1423	91	9503	7201	2302
26	9728	8271	1457	59	9878	8714	1164	92	9503	7963	1540
27	9728	9125	603	60	9878	9192	686	93	9503	8013	1490
28	9728	8455	1273	61	8306	7201	1105	94	9503	5342	4161
29	9728	8714	1014	62	8306	7963	343	95	9503	8694	809
30	8198	9192	-994	63	8306	8013	293	96	9503	8271	1232
31	8198	7201	997	64	8306	5342	2964	97	9503	9125	378
32	8198	7963	235	65	8306	8694	-388	98	9503	8455	1048
33	8198	8013	185	66	8306	8271	35	99	9503	8714	789
								100	9503	9192	311

Tabela 17. Dane do przykładu 14 - rozkład prawdopodobieństwa wyniku finansowego [77]

Wynik finansowy	Liczba przypadków	Prawdopodobieństwo
≥ 0	74	0,74
>100	71	0,71
>200	68	0,68
>300	65	0,65
>400	61	0,61
>500	61	0,61
>600	57	0,57
>700	55	0,55
>800	51	0,51
>900	47	0,47
>1000	45	0,45

Prawdopodobieństwo, że wynik finansowy będzie większy od zera wynosi 74%. Jest ono większe od oczekiwań, więc produkcja nie zostanie wstrzymana.

Zaletą tej metody jest jej uniwersalność. Przy jej pomocy można obliczać dowolne wartości wskaźników efektywności otrzymując w rezultacie cały zakres możliwych wartości wskaźników wraz z ich prawdopodobieństwem wystąpienia [31]. Dodatkowo można za pomocą odpowiednich narzędzi komputerowych określić rozkład prawdopodobieństwa wskaźnika wraz z wartością oczekiwaną i odchyleniem standardowym.

Metody programowania sieciowego

Metody programowania sieciowego to techniki planowania przedsięwzięć, zapewniające sprawny przebieg ich wykonania [68]. Składa się na nie ciąg czynności wzajemnie ze sobą powiązanych. Czynności muszą być wykonywane w określonej kolejności. Wykonanie jednych musi być poprzedzone wykonaniem innych, jakkolwiek są i takie czynności, które mogą być wykonywane jednocześnie [68]. Zależności między zdarzeniami i czynnościami określają strukturę logiczną modelu sieciowego, która może być zdeterminowana, jeśli w trakcie realizacji przedsięwzięcia wszystkie czynności przedstawione w sieci są zrealizowane, lub stochastyczna, jeśli w trakcie realizacji przedsięwzięcia bierze udział tylko część czynności przedstawiona w sieci, z określonym, większym od zera, prawdopodobieństwem.

Metoda PERT

Pomimo że metoda PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) należy do sieci o strukturze logicznej zdeterminowanej, to parametry opisujące poszczególne czynności projektu (lub procesu technologicznego) mogą mieć charakter probabilistyczny. Czasy trwania poszczególnych czynności są zmiennymi losowymi, a ich rozkład prawdopodobieństwa odpowiada rozkładowi beta, którego szczególnym przypadkiem jest rozkład normalny.

Dla każdej czynności dane są trzy parametry oceny czasu trwania poszczególnych czynności tworzących sieć:

- a** - czas optymistyczny, czyli czas trwania czynności w najbardziej sprzyjających warunkach,
- b** - czas pesymistyczny, czyli czas trwania czynności w najmniej sprzyjających warunkach,
- m** - czas modalny, czyli czas najbardziej prawdopodobny, występujący najczęściej przy wielokrotnym powtarzaniu czynności; czas ten może zostać wyznaczony jako wartość środkowa (mediana) przedziału między czasem optymistycznym, a czasem pesymistycznym. Spełniona jest przy tym relacja $a \leq m \leq b$.

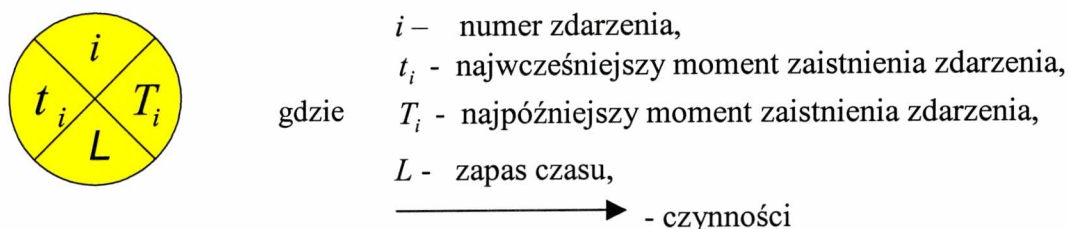
Na podstawie tych trzech ocen czasowych oblicza się oczekiwany czas trwania czynności (t_e) wg następującego wzoru [68]:

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1.23)$$

i wariancję czasu oczekiwanego, określającą odchylenie rzeczywiste czasu trwania czynności od wyznaczonego czasu oczekiwanego [68]:

$$\sigma_{i-j}^2 = \left(\frac{b-a}{6} \right)^2 \quad (1.24)$$

W kolejnym kroku metody należy narysować tzw. sieć czynności w postaci grafu. Elementami grafu są kółka, oznaczające zdarzenia i zawierające określone elementy oraz strzałki, oznaczające przechodzenie do kolejnego stanu. Elementy sieci czynności przedstawia rysunek 13.



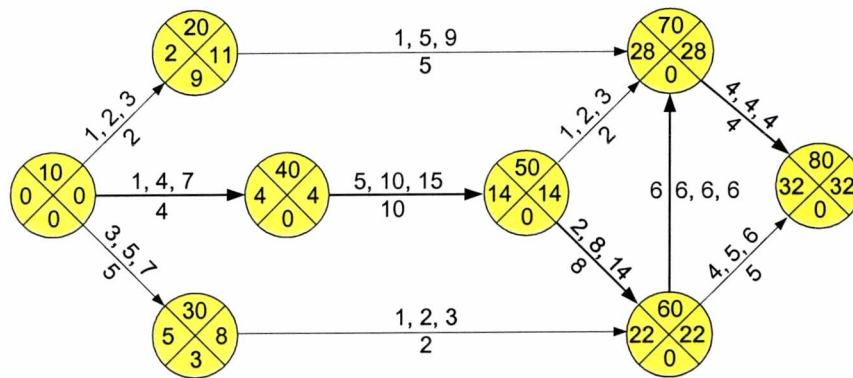
Rys. 13. Podstawowe elementy sieci czynności w metodzie PERT

Przy konstruowaniu grafu należy pamiętać, że bardzo istotną rolę odgrywa ustalenie relacji wszystkich czynności. Czynności muszą być wykonywane w ściśle określonej kolejności, wykonanie jednych musi być poprzedzone wykonaniem innych, a niektóre mogą być wykonywane równolegle [68]. Przy konstrukcji sieci czynności obowiązują pewne reguły - aksjomaty, których należy bezwzględnie przestrzegać, by nie popełnić błędów. Nakazują one, aby [68]:

- istniał dokładnie jeden wierzchołek początkowy i jeden końcowy,
- wierzchołki i łuki powinny być uporządkowane (poprzednik ma mniejszy numer od następnika) $i < j$,
- dwa zdarzenia są połączone tylko jedną strzałką, a jeśli organizacja procesu wymusza sytuację, że początek i koniec dwóch lub więcej czynności dotyczy tych samych wierzchołków (czynności wykonywane równolegle), to należy wprowadzić czynności pozorne, tzn. takie, które mają zerowe czasy trwania.

Nad strzałkami wpisywane są oceny czasów trwania czynności a , m i b , a pod nimi czasy oczekiwane t_e .

Przykład sieci czynności przedstawia rysunek 14.



Rys. 14. Przykładowa sieć czynności

Zarówno oczekiwany czas trwania czynności, jak i wariancję, należy obliczyć dla wszystkich czynności tworzących sieć lub, w zależności od analizowanego problemu, jedynie dla czynności krytycznych (których zapasy czasu są równe zero). Przyjmuje się założenie, że wariancja terminu wykonania (σ_{TW}^2) jest sumą wariancji czynności tworzących sieć lub czynności krytycznych. Znając oczekiwany termin wykonania oraz jego wariancję, można także obliczyć prawdopodobieństwo, że przedsięwzięcie będzie zakończone w pewnym, narzuconym z góry (dyrektywnym), terminie (t_d). Aby określić to prawdopodobieństwo, oblicza się statystykę daną następującym wzorem [68]:

$$x = \frac{t_d - t_w}{\sqrt{\sigma_{TW}^2}}, \quad (1.25)$$

gdzie:

t_d - jest narzuconym z góry terminem,

t_w - oczekiwanym terminem wykonania przedsięwzięcia (najwcześniejszym możliwym terminem zdarzenia końcowego), a

σ_{TW}^2 - wariancją terminu wykonania.

Dla tak obliczonego współczynnika x z tablic dystrybucyj rozkładu normalnego odczytuje się prawdopodobieństwo dotrzymania narzuconego z góry terminu, tzn.:

$$P\{t_d \leq t_w\} = F(x) \quad (1.26)$$

PRZYKŁAD 15. ZASTOSOWANIA METODY PERT [68]

Mając dane czynności składające się na proces produkcyjny o niskim stopniu automatyzacji, przedstawiony na rysunku 14, ich następstwo oraz czasy trwania (tabela 18) należy określić:

- najkrótszy czas trwania procesu produkcyjnego,
- ryzyko nie wyprodukowania wyrobu w założonym czasie 30 min.

Tabela 18. Dane do przykładu 15 - Charakterystyki czasowe operacji technologicznych do metody PERT

Numery operacji technologicznych $i-j$	Czasy trwania operacji technologicznych [min]			Czasy oczekiwane t_e
	Czas optymistyczny a	Czas modalny m	Czas pesymistyczny b	
10 – 20	1	2	3	2
10 – 30	3	5	7	5
10 – 40	1	4	7	4
20 – 50	2	3	4	3
20 – 70	1	5	9	5
30 – 50	3	6	9	6
30 – 60	1	2	3	2
40 – 50	5	10	15	10
50 – 60	2	8	14	8
50 – 70	1	2	3	2
60 – 70	6	6	6	6
60 – 80	4	5	6	5
70 – 80	4	4	4	4

Ścieżka krytyczna, zaznaczona na rysunku 14 pogrubionymi strzałkami, przebiega przez następujące operacje technologiczne:

10-40-50-60-70-80

a najwcześniejszy oczekiwany termin zakończenia procesu produkcyjnego wynosi 32 min.

Jednak, w przypadku czasów trwania czynności procesu produkcyjnego o niskim stopniu automatyzacji, termin jego zakończenia jest wielkością losową, a rzeczywisty termin może się od niego mniej lub bardziej różnić. Stąd niezbędna jest znajomość tego odchylenia – wariancji czasu oczekiwanego (wzór (1.24)).

Wariancje czasu oczekiwanego dla czynności krytycznych przedstawiają się następująco:

$$\sigma_{10-40}^2 = \left(\frac{7-1}{6}\right)^2 = 1 \quad \sigma_{40-50}^2 = \left(\frac{15-5}{6}\right)^2 = \frac{25}{9} \quad \sigma_{50-60}^2 = \left(\frac{14-2}{6}\right)^2 = 4$$

$$\sigma_{60-70}^2 = \left(\frac{6-6}{6}\right)^2 = 0 \quad \sigma_{70-80}^2 = \left(\frac{4-4}{6}\right)^2 = 0$$

$$\text{A zatem } \sigma_{TW}^2 = 1 + \frac{25}{9} + 4 + 0 + 0 = \frac{70}{9}, \text{ skąd } \sigma_{TW} = \sqrt{\frac{70}{9}} = 2,78.$$

Zatem, spodziewana wielkość odchylenia rzeczywistego czasu trwania procesu produkcyjnego od wyznaczonego z sieci terminu oczekiwanego (32 min.) wynosi $\pm 2,78$ min

Znając oczekiwany czas realizacji procesu produkcyjnego oraz jego wariancję można obliczyć ryzyko (prawdopodobieństwo) realizacji procesu w założonym z góry terminie. Aby określić to ryzyko oblicza się statystykę według wzoru (1.25).

$$x = \frac{t_d - t_w}{\sqrt{\sigma_{TW}^2}} = \frac{30 - 32}{\sqrt{\frac{70}{9}}} = \frac{-2}{2,78} = -0,71, \text{ a } F(-0,71) = 0,236651.$$

Jeśli wartości prawdopodobieństwa dotrzymania terminu planowanego znajdują się w granicach[68]:

- 0 do 0,25 - to istnieje znikoma szansa na wyprodukowanie wyrobu w założonym czasie,
- 0,25 do 0,6 - to dotrzymanie terminu jest realne,
- 0,6 do 1 - to istnieją nie wykorzystane moce produkcyjne (istnieje nadmiar zasobów).

Ponieważ w analizowanym przykładzie $F(-0,71) = 0,236651 \leq 0,25$ to można powiedzieć, z prawdopodobieństwem większym niż 0,5, że nie jest możliwe wyprodukowanie wyrobu w założonym czasie, czyli ryzyko wynosi $R \geq 0,5$.

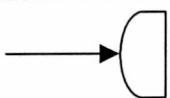
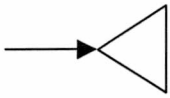
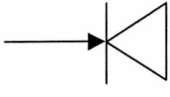
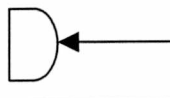
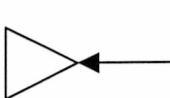
Metoda GERT

Metoda GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*), podobnie jak metoda PERT, należy do metod programowania sieciowego. GERT jest procedurą analizy sieci stochastycznych, powstałą w wyniku połączenia koncepcji [78]:

- budowy sieci typu PERT,
- grafów przepływu sygnałów,
- algebry grafów Elmaghrabiego,
- stosowania elementów logicznych w sieciach.

W odróżnieniu od metody PERT w sieci występują wierzchołki typu „i”, „lub”, „albo”, „może nastąpić”, „musi nastąpić”. W tabeli 19 zamieszczono oznaczenia wierzchołków sieci stochastycznych [78].

Tabela 19. Wierzchołki sieci czynności [78]

Typ wierzchołka	Nazwa wierzchołka	Opis wierzchołka
Wierzchołki typu odbiornik		
	„i” (and node)	Będzie realizowany, jeśli wszystkie łuki prowadzące do niego zostaną zrealizowane.
	„lub” (inclusive-or)	Będzie zrealizowany, jeśli jeden lub kilka łuków prowadzących do niego będzie zrealizowanych.
	„albo” (exclusive)	Będzie zrealizowany, jeżeli jeden i tylko jeden z łuków prowadzących do niego będzie zrealizowany.
Wierzchołki typu źródło		
	„musi nastąpić” (must follow-node)	Będzie zrealizowany, jeżeli zrealizowane zostaną wszystkie łuki z niego wychodzące.
	„może nastąpić” (may follow-node)	Będzie zrealizowany, jeżeli zrealizowany będzie jeden i tylko jeden z łuków wychodzących z niego ze znanym prawdopodobieństwem mniejszym niż jeden.

Procedura budowy grafów nie różni się od metod postępowania dotyczących klasycznych planów sieciowych. Oryginalnym elementem tej metody jest redukcja sieci stochastycznych. Redukcja sieci może być przeprowadzona różnymi metodami. Jedną z nich jest stosowanie grafów zastępczych z wykorzystaniem algebry. W tabeli 20 przedstawione są podstawowe zasady redukcji grafów, polegającej na rysowaniu grafów zastępczych.

Tabela 20. Redukcja grafów z wykorzystaniem grafów zastępczych [78]

Graf oryginalny	Graf zastępczy

Metoda ta jest jednak rzadko używana, ponieważ jej zastosowanie powoduje, iż wykres sieciowy traci swój pierwotny sens. Częściej stosowaną metodą redukcji jest rozwiązanie układu równań liniowych [78]. Wierzchołki grafu można określić równaniami w postaci [68]:

$$w_i = f_i(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (1.27)$$

Graf przepływu sygnałów ilustrowany jest układem równań:

$$[I - T] M = N, \quad (1.28)$$

gdzie:

I - macierz jednostkowa,

T - macierz transmitancji (przepływów),

M - macierz kolumnowa zmiennych zależnych,

N - macierz kolumnowa zmiennych niezależnych.

PRZYKŁAD 16. ZASTOSOWANIA METODY GERT [77]

Dany jest proces produkcyjny realizowany na czterech stanowiskach oznaczonych kolejno 1, 2, 3, 4, stanowisko czwarte jest magazynem wyrobów gotowych. Na poszczególnych stanowiskach realizowane są operacje technologiczne w wyniku których może powstać brak naprawialny, czego wynikiem jest cofnięcie wyrobu w celu powtórzenia poprzednich operacji technologicznych, lub brak nienaprawialny, który jest przenoszony do magazynu braków nienaprawialnych 5. Określone przepływy między stanowiskami w rozpatrywanym przykładzie oznaczają prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń. I tak na przykład przepływ ze

Metody teorii kolejek

Teoria kolejek znajduje zastosowanie w rozwiązywaniu problemów masowej obsługi [7]. Modele masowej obsługi są pomocne w uzyskaniu optymalnych rozwiązań w zakresie doboru: liczby aparatów obsługi w zależności od strumienia zgłoszeń oraz liczby zgłoszeń do obsługi.

Algorytm z pojedynczym kanałem obsługi

Analiza systemów masowej obsługi wymaga pozyskania informacji o momentach przybycia klientów, czasie obsługi oraz o możliwych zachowaniach klientów. W tym celu przyjmuje się następujące parametry [68]:

- | | | |
|-----------|----------------------|---|
| λ | - stopa przybyć; | określa przeciętną liczbę klientów przypadającą na jednostkę czasu, |
| μ | - stopa obsługi; | określa przeciętną liczbę klientów obsługiwanych w jednostce czasu, |
| ρ | -intensywność ruchu; | informuje o stosunku liczby klientów przybywających do liczby klientów obsługiwanych w jednostce czasu; gdzie [68]: |

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1.29)$$

Przyjmuje się założenie, że wszyscy klienci traktowani są na równi. W metodzie rozpatruje się zazwyczaj dwa przypadki [68]:

- a) gdy $\lambda < \mu$ oraz
- b) gdy $\lambda \geq \mu$

W przypadku a), jeżeli dodatkowo założyć się, że obie stopy są stałe, można uznać, że układ zmierza do stanu równowagi [68]. Oznacza to, że prawdopodobieństwo tego iż kolejka ma określoną długość jest stałe w każdej jednostce czasu. W przypadku b) układ jest niestabilny, prawdopodobieństwo zaś długiej kolejki rośnie. Dotyczy to również sytuacji, gdy obie stopy są równe. Wtedy kanał obsługi nie może nadrobić czasu, w którym chwilowo był nieczynny (niewykorzystany).

Po ustaleniu wartości podstawowych parametrów (λ, μ, ρ) następuje rozwiązanie problemu kolejki [47]. Rozwiązanie to sprowadza się do wskazania najlepszego w danych warunkach (optymalnego) układu czynników kontrolowanych przez kierownictwo badanej jednostki.

Algorytm z wielokrotnymi kanałami obsługi

W przypadku istnienia wielu kanałów obsługi algorytm znacznie się komplikuje. Poszczególne wzory zależą od przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa przybyć klientów do kolejki. Dodatkowo wprowadza się następujące stałe i zmienne [7, 47, 68]:

- r - liczba kanałów obsługi,
- k - długość kolejki,
- a - maksymalna wydajność punktu obsługi.

Poniżej przedstawiono najważniejsze wzory dla systemów, w których długość kolejki zawiera się między jednością a liczbą kanałów obsługi [7, 68]:

Średni czas oczekiwania w kolejce (T) [7]:

$$T = \frac{P_m}{r(a - \lambda)} \quad (1.30)$$

Prawdopodobieństwo zajęcia wszystkich kanałów obsługi (P_m) [7]:

$$P_m = \frac{\Omega^r}{r!(1 - \mu)} P_0 \quad (1.31)$$

Prawdopodobieństwo tego, że w układzie oczekuje $n=0$ jednostek (brak kolejki) [68]:

$$p(n=0) = \frac{1}{\sum_{i=0}^{r-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^r}{(r-\rho)(r-1)!}} \quad (1.32)$$

Prawdopodobieństwo przestoju systemu (P_0) [7]:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{m-1} \frac{\Omega^k}{k!} + \frac{\Omega^m}{m!(1-\mu)}} \quad (1.33)$$

Prawdopodobieństwo, że czas oczekiwania w kolejce jest dłuższy niż t_0 [68]:

$$p(t > t_0) = p(n > r-1) e^{-\mu_0(r-\rho)} \quad (1.34)$$

Współczynnik intensywności obsługi (Ω) [7]:

$$\Omega = \frac{\lambda}{a} \quad (1.35)$$

W przypadku wielu kanałów obsługi μ przyjmuje postać [7]:

$$\mu = \frac{\lambda}{r \times a} \quad (1.36)$$

PRZYKŁAD 17. ZASTOSOWANIA METODY TEORII KOLEJEK [68]

W przedsiębiorstwie produkcyjnym transport elementów do produkcji na linię produkcyjną odbywa się przy pomocy wózków. Załadunek wózków odbywa się w magazynie surowców i dokonywany jest przez jednego z dwóch magazynierów. Oszacowano średnie stopy przybyć i obsługi i otrzymano następujące wyniki: $\lambda = 3,8$ wózka/godz., a $\mu = 2$ wózki/godz. Przedsiębiorstwo zamierza dokonać analizy kolejki i zamierza uzyskać odpowiedzi na następujące pytania:

- Czy system logistyczny zmierza do stanu równowagi?
- Jakie jest ryzyko że wózek będzie musiał oczekiwać na załadunek?
- Jakie jest ryzyko, że wózek będzie musiał oczekiwać na załadunek dłużej niż 0,5 godz.?

Ad a) Należy sprawdzić czy zachodzi nierówność $\lambda < r\mu$, gdzie: $\lambda = 3,8$; $\mu = 2,0$; $r = 2$;

Po podstawieniu $3,8 < 4,0$, co świadczy o tym, że stan równowagi układu może być osiągnięty.

Ad b) Na podstawie wzoru (1.32) można wyznaczyć:

$$p(n=0) = \frac{1}{1 + 0,95 + \frac{(0,95)^2}{1,05 \cdot 1}} = 0,355932 \approx 0,36, \text{ zatem ryzyko, że wózek będzie oczekiwał na}$$

załadunek wynosi $R = 1 - p(n=0) = 1 - 0,36 = 0,64$.

Ad c) Na podstawie wzoru (1.34) można wyznaczyć:

$$p(t > 0,5) = p(n > 1)e^{-2 \cdot 0,5(2-0,95)} = 0,305932 \cdot 0,349938 = 0,107057 \approx 0,11, \text{ co oznacza że}$$

ryzyko oczekiwania przez wózek na załadunek jest niewielkie, gdyż wynosi 0,11.

1.8 Porównanie metod ilościowych analizy i oceny ryzyka

Ryzyko towarzyszy każdej działalności gospodarczej. Jednak przy podejmowaniu decyzji produkcyjnych, rzadko dokonuje się jego planowania i oceny [6, 14, 77]. Ten stan rzeczy może być spowodowany niezbyt przydatnymi w rzeczywistości produkcyjnej metodami ilościowymi proponowanymi przez literaturę.

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale metody ilościowe analizy i oceny ryzyka odnoszą się do pojedynczych zagadnień, zakładając wystąpienie odpowiednich czynników i warunków oraz narzucając ograniczenia. Analizując je można stwierdzić, że aby ocenić ryzyko procesu produkcyjnego w jego rzeczywistym otoczeniu, należy zagadnienie tak uprościć, aby możliwe było zastosowanie metody. Biorąc pod uwagę złożoność dzisiejszych systemów produkcyjnych oraz oddziałujących na nie liczbę losowych czynników zewnętrznych, podejście to nie wydaje się właściwe, gdyż wyniki uzyskane z takiej analizy mogą być obarczone zbyt dużym błędem.

Trudności w szerszym i powszechniejszym wykorzystaniu metod ilościowych do planowania i oceny ryzyka procesów produkcyjnych spowodowane są również sposobem ich opisu. Pozycje literaturowe przedstawiają metody zazwyczaj na wybranych

przykładach, z licznymi ograniczeniami, lub poprzez ogólny opis słowny, z pominięciem twierdzeń i definicji matematycznych.

Tabela 21 przedstawia porównanie opisanych w niniejszym rozdziale metod analizy i oceny ryzyka. Kryteria porównawcze wybrano tak aby pokazać ich przydatność w rozwiązywaniu problemów praktycznych.

Tabela 21. Porównanie metod ilościowych analizy i oceny ryzyka

METODA	ZNAJOMOŚĆ ROZKŁADU	LICZBA DANYCH WEJŚCIOYCH	SEKWENCYJNOŚĆ	CZY METODA GRAFICZNA?	SKOMPLIKOWANOŚĆ
METODY STATYSTYCZNE					
analityczna	○	○	○	●	○
analizy prawdopodobieństwa	○	●	○	●	○
funkcji rozkładu normalnego	●	○	○	●	○
zmiennej standaryzowanej	●	○	○	●	○
Bayesa	○	●	○	○	●
analizy odchylenia standardowego (FI)	○	●	○	○	○
analizy przyrostów	○	●	○	●	●
histogramów częstości	○	○	○	●	○
analizy korelacji	○	●	○	●	●
analizy wrażliwości	○	○	○	○	○
testu dla wartości średniej populacji	●	○	○	●	●
METODY BADAŃ OPERACYJNYCH					
algorytm simlpeks	○	●	●	●	●
drzewa decyzyjnego	○	●	●	●	○
Monte Carlo	●	●	●	○	●
GERT	●	●	●	●	●
PERT	●	●	●	●	●
teorii kolejek	○	○	○	○	●
LEGENDA					
● - dużo / tak		● - średnio / trochę		○ - mało / nie	

Analizując porównanie przedstawione w tabeli 21 koniecznym wydaje się dostosowanie metod do aktualnego poziomu rozwoju techniki i technologii procesów produkcyjnych, jak też do możliwości zbierania, gromadzenia i przetwarzania danych.

Rozdział 2. Cel, teza i przyjęte zadania badawcze w pracy

Odniesiono się do analizy literaturowej przedstawionej w rozdziale 1 z zakresu ryzyka oraz metod jego analizy i oceny. Wskazano na braki i przyczyny uniemożliwiające wykorzystanie definicji, klasyfikacji oraz metod oceny ryzyka w systemach produkcyjnych. Zdefiniowano cel główny pracy, tezę, wyznaczono zadania naukowe i praktyczne.

Przedstawiona w rozdziale pierwszym analiza literaturowa wskazuje na wieloznaczność i rozległość pojęcia ryzyka. Zaprezentowano w nim spotykane w literaturze podejścia, grupy definicji, rodzaje klasyfikacji, jak również klasy i grupy metod analizy i oceny ryzyka. Biorąc jednak pod uwagę charakter współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych, jak i cechy ich otoczenia, to wydaje się, że wiedza ta jest nieadekwatna i niewystarczająca do przeprowadzenia planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwach przemysłowych w ich rzeczywistych warunkach funkcjonowania.

Mimo mnogości dziedzin, w których występuje pojęcie ryzyka i w których jest ono oceniane i analizowane, nie można wiedzy na jego temat przenosić wprost na grunt systemów produkcyjnych. W stosunkowo dobrze rozwiniętym obszarze ryzyka finansowego wychodzi się z założenia, że inwestor, podejmując większe ryzyko związane z inwestycją, spodziewa się uzyskać większe korzyści finansowe (tzw. podejście amerykańskie). Ryzyko produkcyjne ma zupełnie inną specyfikę. Oczekiwane rezultaty produkcyjne nie mogą być większe niż pozwalają na to np. ograniczenia związane z posiadaną technologią lub organizacją procesu produkcyjnego. Powoduje to, że wiele metod analizy i oceny ryzyka, już na poziomie podejścia, nie może być wykorzystane do planowania i oceny ryzyka w systemach produkcyjnych.

Dzisiejsze procesy produkcyjne są bardzo złożone, gdyż przebiegają przez wiele obszarów organizacji, składają się z wielu elementów, oddziałuje na nie wiele czynników pochodzących z różnych obszarów tej organizacji. Chcąc analizować, planować i oceniać ryzyko realizacji procesu produkcyjnego, wydaje się koniecznym powiązanie czynników ryzyka z jego obszarami, etapami lub elementami. Umożliwi to wyznaczenie obszaru o największym poziomie ryzyka oraz jego późniejszą eliminację. Niestety, przedstawiona w rozdziale pierwszym analiza literaturowa ma wyraźne braki w tym zakresie. Już na poziomie klasyfikacji widać brak możliwości zastosowania istniejących klasyfikacji dla potrzeb oceny ryzyka procesu produkcyjnego.

Zaprezentowane w rozdziale pierwszym metody analizy i oceny ryzyka niezbyt dobrze nadają się do wykorzystania w złożonej rzeczywistości gospodarczej

i organizacyjnej systemu produkcyjnego. Stosowanie ich pociąga za sobą konieczność znacznego upraszczania problemu i dostosowania ocenianego przypadku do możliwości metody. Powoduje to, że zastosowanie ich w rozwiązaniach problemów złożonych, a taki charakter mają systemy produkcyjne, może być niemożliwe lub uzyskany wynik może być obciążony zbyt dużym błędem. Z tego powodu wydaje się zasadne opracowanie metody planowania i oceny ryzyka systemu produkcyjnego, którą można by zastosować w złożonej rzeczywistości organizacyjnej i gospodarczej przedsiębiorstw przemysłowych.

Możliwość taką dałoby wykorzystanie metod i narzędzi symulacyjnych. Budowa modelu symulacyjnego systemu produkcyjnego oraz możliwość przeprowadzenia na min eksperymentów symulacyjnych szybko dostarczy potrzebnych danych na temat ryzyka realizacji analizowanego procesu i obciążającego planowane decyzje.

Ponieważ żadna z przedstawionych w rozdziale pierwszym definicji i klasyfikacji ryzyka nie uzależnia go od obszarów, etapów lub elementów składowych, postanowiono w dalszej części pracy, zdefiniować system produkcyjny w ujęciu teorii systemów. Takie podejście powinno stworzyć możliwość jego dowolnej dekompozycji i wyznaczenie struktury niezawodnościowej. Potraktowanie ryzyka jako zawodności systemu produkcyjnego powinno pozwolić na zastosowanie metod i narzędzi dotychczas nie wykorzystanych w analizie i ocenie ryzyka.

Aby przeprowadzona analiza i ocena ryzyka była przydatna dla przedsiębiorstwa, powinna, oprócz wskazania obszarów o największym poziomie ryzyka, dawać możliwość oszacowania ich rzeczywistej wielkości. Jak wiadomo, w każdym systemie produkcyjnym istnieje pewien poziom organizacji, który może zakłócać pomiar rzeczywistego wpływu czynników ryzyka na system. Przykładem mogą być np. zapasy, które zmniejszają ryzyko opóźnień dostaw. W celu wyznaczenia rzeczywistej wielkości ryzyka w systemie produkcyjnym, wydaje się konieczne opracowanie ilościowych współczynników wagowych, określających rzeczywisty wpływ zakłóceń na przebieg i realizację procesu produkcyjnego.

W związku z powyższym za **główny cel pracy** przyjęto:

Opracowanie metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych oraz ilościowych współczynników wagowych, które umożliwią wyznaczenie rzeczywistej wielkości wpływu czynników ryzyka na system produkcyjny niezależnie od jego poziomu organizacji.

Dla tak postawionego celu przyjęto następującą **tezę pracy**:

Operacyjny model symulacyjny systemu produkcyjnego o określonej strukturze niezawodnościowej umożliwia identyfikację, wartościowanie oraz lokalizację w systemie produkcyjnym czynników ryzyka, co pozwala na zapobieganie ich skutkom lub na ich eliminację.

Na podstawie analizy specyfiki współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych oraz ich otoczenia założono, że opracowana metodyka planowania i oceny ryzyka realizacji założonego celu przez system produkcyjny powinna:

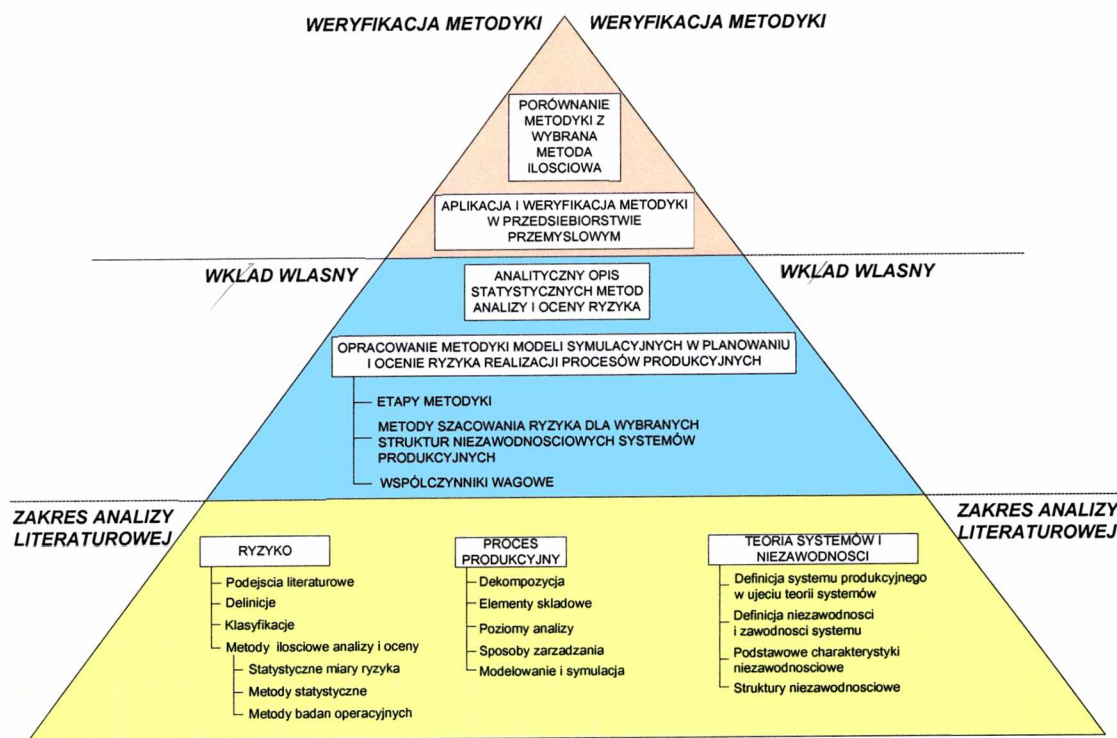
- ograniczać możliwość podjęcia błędnych decyzji planistycznych, dzięki określeniu wielkości i struktury ryzyka nie zrealizowania przez proces produkcyjny założonego celu,
- wskazywać na obszary w przedsiębiorstwie lub etapy w procesie wytwórczym, w których występują największe zakłócenia wpływające negatywnie na realizację procesu produkcyjnego,
- pozwalać na eliminację czynników ryzyka poprzez możliwość wyznaczania ich struktury, wielkości wpływu i lokalizacji w systemie wytwórczym,
- umożliwiać opracowanie rozwiązań organizacyjnych i programów naprawczych obniżających poziom ryzyka dzięki poznaniu jego struktury, wielkości wpływu i lokalizacji w systemie wytwórczym,
- pozwalać na weryfikację planów rozwojowych o poziom ryzyka w stosunku do rzeczywistych możliwości produkcyjnych przedsiębiorstwa.

Aby opracowana metodyka była użyteczna dla przedsiębiorstw produkcyjnych i przyczyniała się do poprawy ich konkurencyjności powinna:

- zawierać zalgorytmizowany sposób postępowania przy wyznaczaniu poziomu ryzyka,
- zawierać metody umożliwiające oszacowanie wielkości ryzyka w różnych typach struktur systemu produkcyjnego oraz w poszczególnych jego obszarach,
- dawać możliwość wyznaczenia czynników ryzyka powodujących największe zakłócenia w systemie produkcyjnym, co pozwoli na ich późniejszą eliminację,
- dawać możliwość wyznaczenia struktury czynników ryzyka, co umożliwi opracowanie programów naprawczych,
- umożliwiać dekompozycję systemu produkcyjnego na elementy składowe w zależności od celu prowadzonej analizy symulacyjnej,

- dawać możliwość uwzględnienia dowolnej liczby danych na temat procesu produkcyjnego i jego otoczenia w zależności od celu prowadzonej analizy,
- ze względu na dynamikę otoczenia umożliwiać szybką zmianę parametrów realizacji procesu produkcyjnego oraz pozwalać na analizę różnych wariantów decyzji,
- szybko dostarczać potrzebnych danych bez konieczności ingerencji w przebieg i realizację rzeczywistego procesu produkcyjnego,
- zawierać konstrukcję współczynników wagowych, pozwalających na wyznaczenie rzeczywistego wpływu poszczególnych czynników ryzyka na elementy systemu produkcyjnego niezależnie od jego poziomu organizacji oraz ich oddziaływanie na zmiany organizacyjne ograniczające ich negatywny wpływ,

Rysunek 16 przedstawia ogólny schemat pracy.



Rys. 16. Ogólny schemat pracy

Aby osiągnąć przyjęty cel pracy przyjęto **następujące zadania badawcze**:

- analiza dotychczasowego stanu wiedzy na temat ryzyka, sposobów jego definicji, klasyfikacji oraz metod analizy i oceny,
- literaturowy przegląd wiedzy na temat systemów produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich dekompozycji na elementy składowe, poziomów analizy oraz wskaźników umożliwiających zarządzanie procesem produkcyjnym,
- zdefiniowanie systemu produkcyjnego zgodnie z teorią systemów,

- przedstawienie struktur systemów produkcyjnych w kontekście struktur niezawodnościowych oraz zaproponowanie definicji produkcyjnej struktury równoległej,
- opracowanie metod wyznaczania ryzyka całkowitego procesu produkcyjnego oraz ryzyka w poszczególnych obszarach i strat powodowanych występowaniem czynników ryzyka,
- opracowanie konstrukcji ilościowych współczynników wagowych umożliwiających wyznaczenie rzeczywistej wielkości wpływu czynników ryzyka na system produkcyjny niezależnie od jego poziomu organizacji,
- analiza możliwości zastosowania metod modelowania i narzędzi symulacyjnych w ocenie ryzyka systemów produkcyjnych,

Aby zweryfikować przydatność opracowanej metodyki w praktyce i porównać uzyskane wyniki z metodami proponowanymi w literaturze, w części praktycznej pracy zostanie przeprowadzona weryfikacja metodyki w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym oraz zostanie przeprowadzone porównanie opracowanej metodyki z wybraną metodą literaturową.

Rozdział 3. Charakterystyka i modelowanie procesów produkcyjnych

Zawiera charakterystykę systemów oraz opis elementów wchodzących w skład procesu produkcyjnego, możliwości jego dekompozycji oraz poziomów analizy. Scharakteryzowano podstawowe wskaźniki procesu produkcyjnego i ich rolę w systemie zarządzania. Przedstawiono możliwości modelowania i symulacji systemów produkcyjnych, rodzaje modeli i zadania modelowania, przebieg eksperymentu symulacyjnego oraz rodzaje symulacji, ze szczególnym uwzględnieniem symulacji ciągłej i dyskretniej procesów produkcyjnych. Omówiono wady i zalety stosowania symulacji.

Najważniejszym zadaniem zarządzania produkcją jest kształtowanie zjawisk zachodzących w procesie produkcyjnym zgodnie z zakładanymi celami przedsiębiorstwa i przy uwzględnieniu wszelkich warunków i okoliczności realnych procesów produkcyjnych [12]. Wszelkie zmiany w obrębie procesów produkcyjnych poprzedzane są odpowiednimi decyzjami produkcyjnymi. Decyzje produkcyjne mają kluczowe znaczenie dla dalszego funkcjonowania przedsiębiorstw przemysłowych. Z uwagi na charakter systemów produkcyjnych decyzje podejmowane są zawsze w warunkach ryzyka lub niepewności (porównaj rozdział 1 punkt 1.2). Biorąc pod uwagę dodatkowo złożoność procesów produkcyjnych oraz ich powiązania z innymi obszarami przedsiębiorstwa i z otoczeniem, podjęcie decyzji produkcyjnych powinno zostać poprzedzone analizą systemu produkcyjnego oraz oceną ryzyka związanego z jej podjęciem. Aby analiza systemu i ocena ryzyka mogła być przeprowadzona szybko oraz bez ingerencji w realizację i przebieg procesu produkcyjnego, niezbędnym wydaje się budowa modeli symulacyjnych.

Jednym z podstawowych problemów w analizie systemów produkcyjnych jest ich odpowiednia dekompozycja na elementy składowe [12]. Dekompozycja ta powinna zależeć od celów postawionych w procesie zarządzania przed podejmującą decyzje [55]. Duża złożoność oraz hierarchiczna struktura procesów i systemów produkcyjnych powoduje problemy z określeniem odpowiedniego poziomu oraz liczby poziomów, dla których będzie przeprowadzana analiza. Przeprowadzenie analizy pociąga również za sobą konieczność zebrania danych pochodzących niejednokrotnie z wielu obszarów przedsiębiorstwa. W tym celu jest zbieranych i analizowanych wiele wskaźników opisujących system produkcyjny. W związku z tym coraz częściej budowane są modele symulacyjne systemów produkcyjnych, a przy wyborze wariantu decyzji wykorzystuje się takie narzędzia informatyczne, jak np. zintegrowane systemy informatyczne i programy symulacyjne [55].

3.1 Definicja typy i sposoby dekompozycji procesów produkcyjnych

Mianem procesu produkcyjnego określa się „*uporządkowany zbiór działań (operacji, czynności) mających na celu wykonanie produktu (wyrobu lub usługi)*” [71, 72]. Proces produkcyjny przebiega w środowisku systemu produkcyjnego, czyli przedsiębiorstwa [12]. System produkcyjny to „*układ wzajemnie powiązanych ze sobą zasobów materialnych, energetycznych, kadrowych, kapitałowych i informacyjnych. Jest on celowo zaprojektowany i zorganizowany tak, by zaspokajać potrzeby klientów*” [12, 72]. System produkcyjny nie może istnieć bez otoczenia, z którego pochodzą zasoby i w którym generowane są zyski niezbędne do dalszego funkcjonowania [34]. Otoczenie to zmienia się i oddziałuje na system produkcyjny, i odwrotnie.

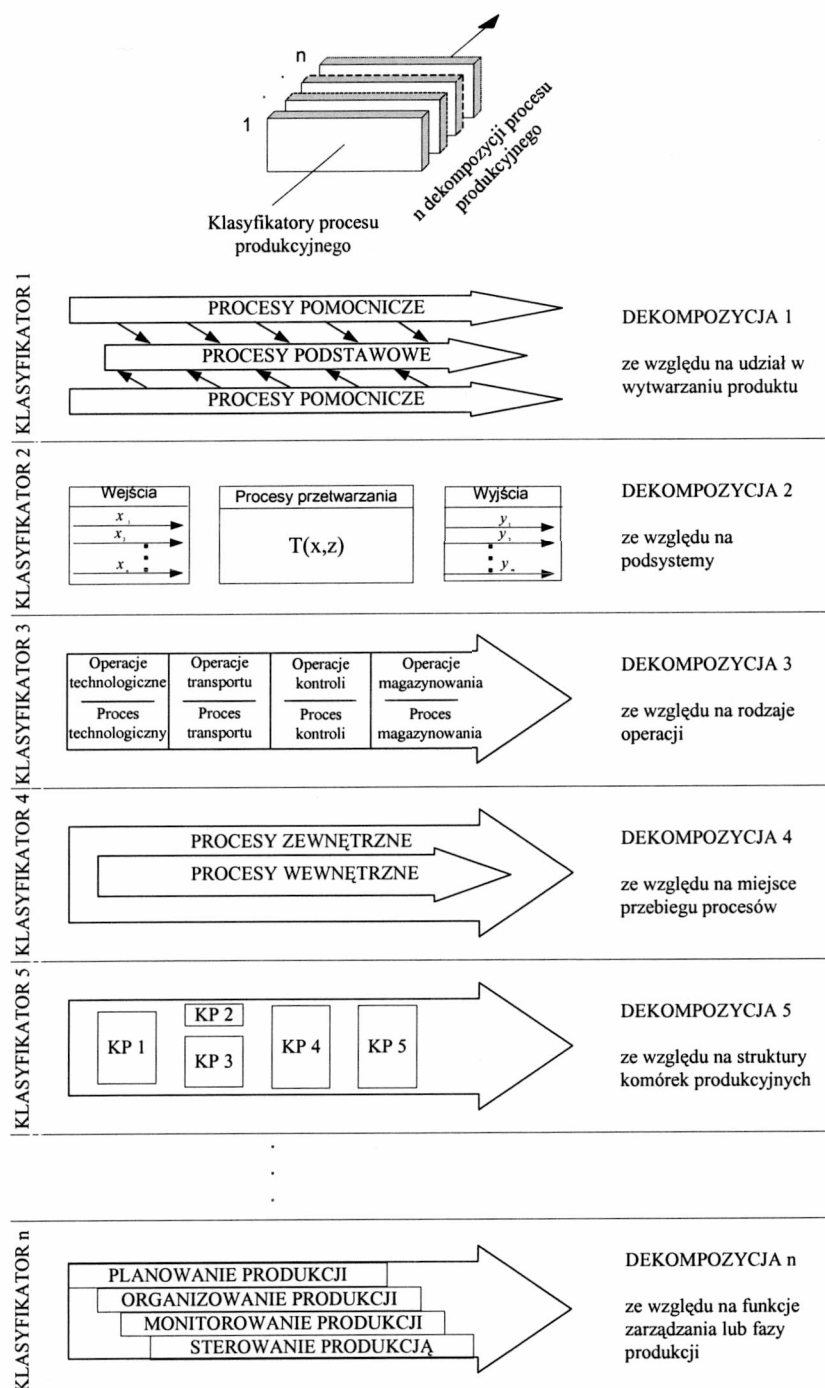
W zależności od charakteru strumieni materiałów dominujących w danej produkcji wyróżnia się:

- **systemy o produkcji ciągłej**, oparte na ciągłych procesach technologicznych, takich jakie występują w energetyce czy przemyśle chemicznym,
- **systemy o produkcji nieciągłej** (tzw. dyskretne systemy produkcyjne), oparte na dyskretnych procesach technologicznych, typowych dla przemysłu elektromaszynowego, w tym przemysłu samochodowego, budowy maszyn czy przemysłu wyrobów gospodarstwa domowego.

W obecnej praktyce przemysłowej procesy ciągłe, związane z przetwarzaniem jednorodnych lub zbliżonych do jednorodnych strumieni materiałów, cieczy, gazów, ciał sypkich lub ich mieszanin, są w wysokim stopniu zautomatyzowane. Systemy o produkcji nieciągłej, przetwarzające strumienie niejednorodnych materiałów, związane z obróbką wórową, plastyczną, spawaniem i montażem, są mało zautomatyzowane i właśnie w nich obserwuje się zachodzące od kilku lat zmiany mające silny wpływ na obecne i przyszłe oblicze przemysłu [27]. Zmiany te wspiera idący w parze rozwój nowych metod i środków wytwarzania, w którym wykorzystywane są możliwości współczesnej techniki komputerowej. Z kolei, do rozwoju komputerowo wspomaganych systemów produkcyjnych przyczynia się, oprócz aktualnego stanu rozwoju techniki komputerowej, również rozwój nowych metod programowania matematycznego, modelowania i symulacji komputerowej, a także wzrastający rozwój technologii, metod zarządzania i organizacji produkcji.

Wybrane i przytoczone powyżej definicje i typy systemów produkcyjnych nie oddają w pełni ich specyfiki. Z uwagi na ich złożoność nie ma fizycznej możliwości przedstawienia ich specyfiki oraz wszystkich elementów składowych w pojedynczych definicjach lub schematach, a ich dekompozycja powinna zależeć od zakresu i obszaru

prorowadzonych badań oraz od przyjętych klasyfikatorów podziałowych [79]. Wybrane koncepcje dekompozycji systemu produkcyjnego przedstawia rysunek 17.



Rys. 17. Wieloprzekrojowa dekompozycja systemu produkcyjnego z uwagi na wybrane klasyfikatory

Dekompozycja 1 dzieli procesy w zależności od ich związku z produkowanym wyrobem. Procesy produkcyjne podstawowe bezpośrednio realizują zasadnicze cele lub zadania systemu produkcyjnego w postaci produktów przekazywanych otoczeniu systemu. Procesy pomocnicze obsługują wszystkie procesy w systemie produkcyjnym, zasilając je swoimi wytworami, usługami lub informacjami. Efektem ich realizacji jest istnienie sieci

sprzężeń pomiędzy systemem i otoczeniem [12]. Dekompozycja 2 zakłada podział systemu produkcyjnego na podsystem wejść do systemu, podsystem przetwarzania i podsystem wyjść z systemu. Jest to ujęcie cybernetyczne systemu produkcyjnego i będzie szerzej omówione w rozdziale 4. Kolejna dekompozycja zakłada podział systemu produkcyjnego na procesy według poszczególnych rodzajów operacji produkcyjnych, czyli zespołów czynności zmierzających do przekształcenia materiałów wejściowych w wyroby [71]. Odpowiednio do zjawisk występujących w procesie produkcyjnym operacje produkcyjne mogą występować jako operacje: technologiczne, transportowe, kontroli, magazynowania, konserwacji. Zbiór operacji technologicznych tworzy proces technologiczny, zbiór operacji transportowych tworzy proces transportowy, a zbiór operacji kontroli, konserwacji i magazynowania tworzy odpowiednio procesy kontroli, konserwacji i magazynowania.

System produkcyjny można podzielić na procesy, w zależności od miejsca w którym przebiegają, na procesy zewnętrzne – odbywające się poza przedsiębiorstwem i wewnętrzne - odbywające się w przedsiębiorstwie. Chcąc analizować strukturę systemu produkcyjnego, można zdekomponować go na poszczególne komórki produkcyjne, ale również, choć nie jest to przedstawione na rysunku 17, na gniazda produkcyjne, komórki i pionory organizacyjne, poszczególne wyroby itd. System produkcyjny można też analizować pod względem poszczególnych funkcji zarządzania i faz produkcyjnych.

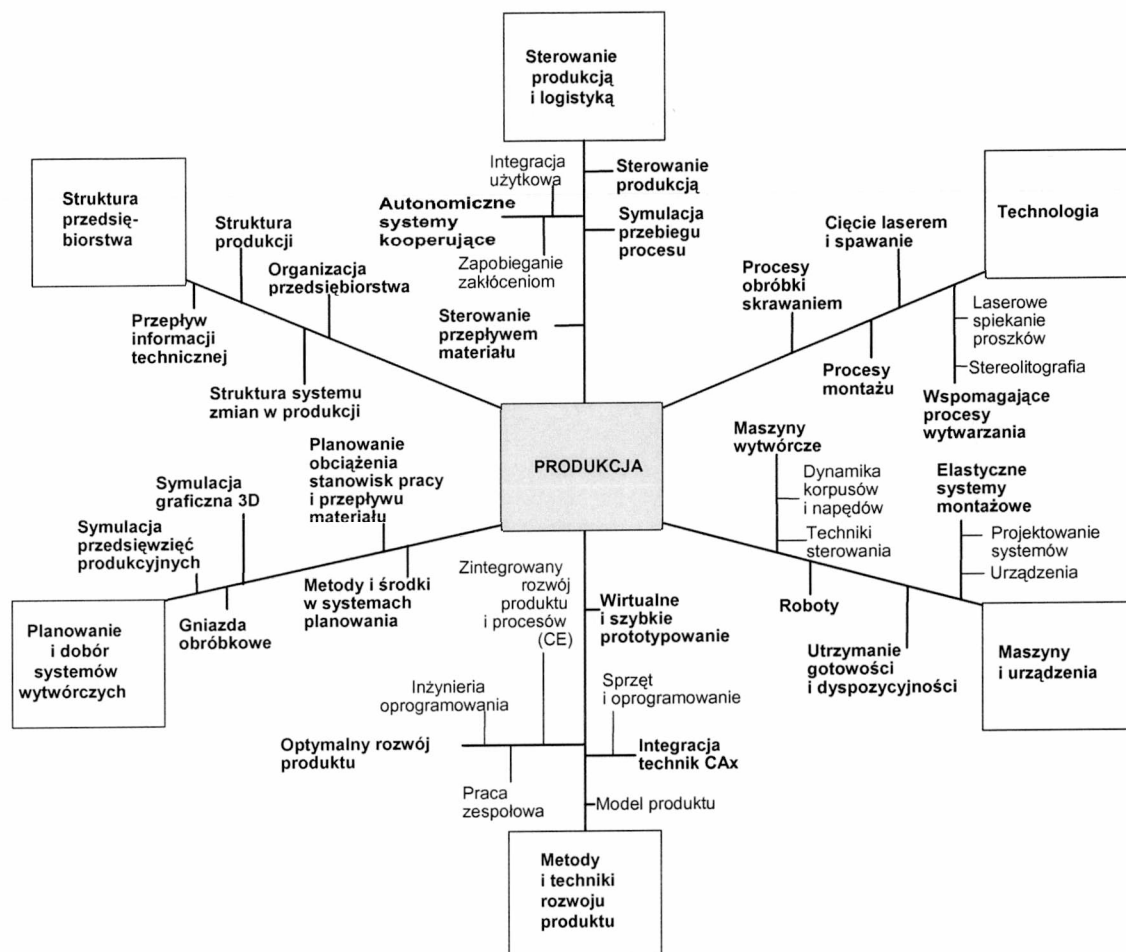
Przedstawione na rysunku 17 i omówione powyżej klasyfikacje nie wyczerpują możliwości klasyfikacji i podziału procesów produkcyjnych, a stanowią jedynie klasyfikacje spotykane najczęściej w literaturze [12, 35, 71, 72]. Sposób dekompozycji powinien zależeć od celu stawianego analizie systemu produkcyjnego, tak aby podjęta w oparciu o nią decyzja była optymalna i obciążona jak najmniejszym ryzykiem.

3.2 Elementy systemu i procesu produkcyjnego

W analizie systemu produkcyjnego, oprócz odpowiedniej dekompozycji, równie ważny jest wybór elementów, które będą analizowane. Można wymienić przynajmniej sześć istotnych elementów decydujących o strukturze i cechach realizowanych procesów produkcyjnych. Należą do nich [20]:

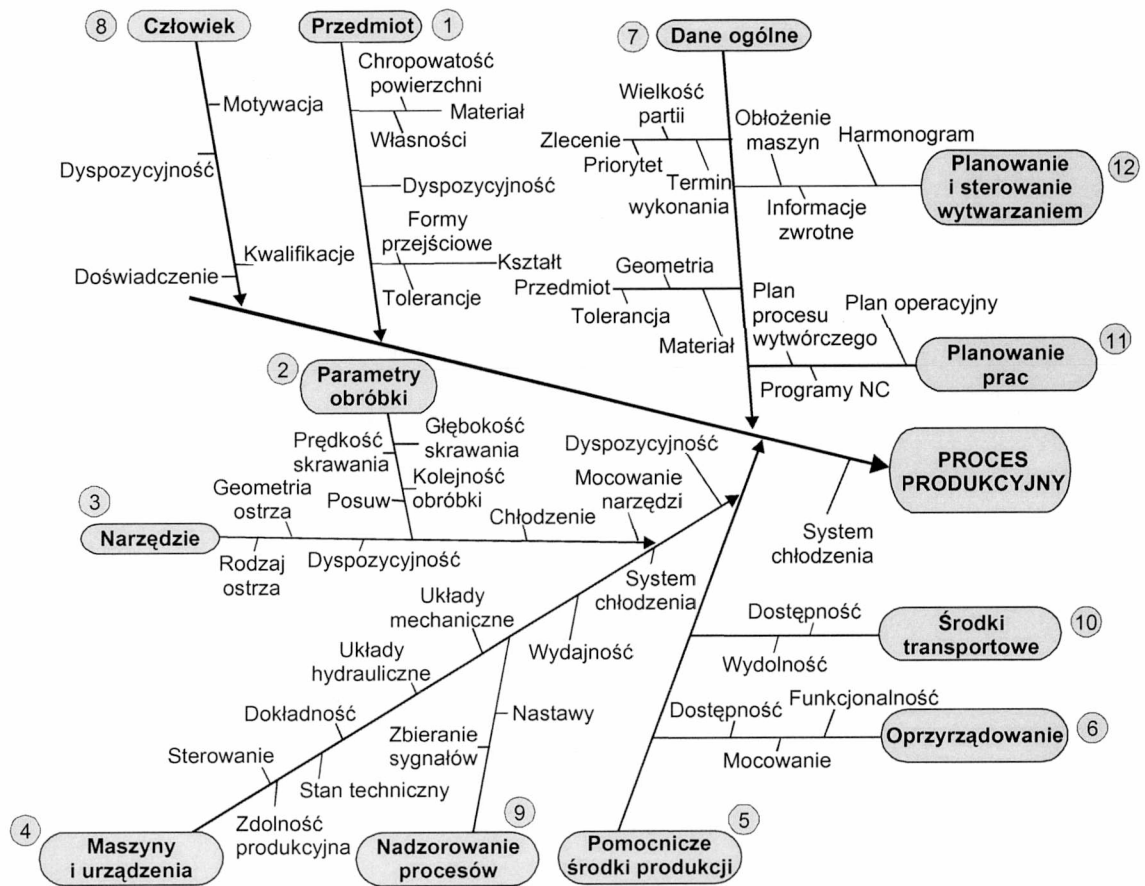
- organizacyjna struktura przedsiębiorstwa,
- zasady sterowania produkcją i logistyką,
- technologie,
- techniki i metody rozwoju produktu i procesów produkcyjnych,
- zasady planowania i doboru systemów wytwórczych,
- maszyny i urządzenia wytwórcze.

Elementy te mogą mieć postać różnorodnych środków technicznych, organizacyjnych, technik, metod, a nawet zjawisk [20]. Wymienione powyżej elementy oraz ich najważniejsze składowe schematycznie prezentuje rysunek 18.



Rys. 18. Główne elementy i ich składowe opisujące proces produkcyjny [20]

Na specyfikę procesu produkcyjnego, oprócz wyżej wymienionych elementów, wpływ mają poszczególne parametry. Ponieważ proces produkcyjny przebiega przez różne obszary przedsiębiorstwa, to również parametry go opisujące pochodzą z wielu obszarów. Parametrów opisujących proces produkcyjny jest nieskończenie wiele, tak jak i sposobów jego dekompozycji. Wybór odpowiednich parametrów w analizie procesu powinien zależeć od problemu decyzyjnego. Bardzo uproszczoną strukturę parametrów opisujących proces produkcyjny przedstawia rysunek 19.



Rys. 19. Struktura podstawowych parametrów procesu produkcyjnego [20]

Hierarchiczne przedstawienie struktury parametrów procesu produkcyjnego pokazuje również wzajemne powiązania poszczególnych obszarów przedsiębiorstwa oraz funkcji i parametrów procesu.

3.3 Poziomy analizy i struktura systemu produkcyjnego

W analizie systemu produkcyjnego, oprócz odpowiedniej dekompozycji, wyboru elementów i parametrów do jego opisu, bardzo ważne jest określenie poziomu lub ilości poziomów, na których system będzie analizowany. W tym celu można się posłużyć strukturą produkcyjną z uwagi na jej uniwersalny charakter, możliwość adaptacji jej do różnorodnych dekompozycji procesu oraz całościowe ujęcie procesu produkcyjnego.

Struktura produkcyjna to układ komórek produkcyjnych oraz zespół związków kooperacyjnych zachodzących między nimi, właściwy dla danego systemu produkcyjnego jako całości [12]. Komórki produkcyjne mogą być różnych stopni. Najmniejszą (niepodzielną) komórką produkcyjną jest stanowisko robocze. Stanowisko robocze określa się jako komórkę produkcyjną stopnia zerowego – (KP^0) [71]. Stanowisko robocze w rzeczywistych procesach produkcyjnych z reguły nie występuje samodzielnie, lecz jest

[94, 95]. Analiza ich wartości dostarcza informacji i umożliwia podjęcie odpowiednich decyzji. Tak jak poprzednio, również wybór wskaźników opisujących stan systemu produkcyjnego powinien zależeć od celu stawianego analizie [55].

Wszystkie dane przedsiębiorstwa mogą być wskaźnikami. Istnieją następujące rodzaje wskaźników [59]:

- **proste** - wskaźniki rejestrowane bezpośrednio (np. dane o zleceniach, dane z rachunkowości) lub jako agregacja liczb rejestrowanych bezpośrednio w wyniku sumy, różnicy i iloczynu (np. obroty w okresie, koszty w okresie);
- **złożone** - uzyskane poprzez iloraz wskaźników prostych. Należą do nich:
 - wskaźniki udziału – licznik i mianownik posiadają ten sam wymiar; suma wielkości udziałów w całości nie może przekraczać 1 (lub 100%), np. udział bezpośrednich kosztów materiałowych jednego z produktów do całości kosztów materiałów bezpośrednich w okresie;
 - wskaźniki stosunku – licznik i mianownik mogą mieć różny wymiar (np. koszty pomieszczeń zł/m², stawki narzutów w kalkulacji); przy tym samym wymiarze wskaźniki mogą mieć wartość ponad 100%;
 - indeksy – licznik i mianownik mają ten sam wymiar, odnoszą się jednak (z reguły) do różnych okresów (np. indeks wzrostu cen do planowania cen sprzedaży).

Wymienione powyżej grupy wskaźników mogą tworzyć tzw. systemy wskaźników, stanowiące kombinację dwóch lub więcej wskaźników za pomocą podstawowych operacji matematycznych [59]. Systemy wskaźników tworzone są za pomocą jednego lub kilku wskaźników głównych, które umożliwiają syntetyczną ocenę stanu przedsiębiorstwa i następnie są opisywane poprzez wskaźniki pomocnicze lub cząstkowe.

Powszechnie uważa się, że złożoną rzeczywistość przedsiębiorstwa produkcyjnego i przebiegających w nim procesów produkcyjnych trudno jest ująć jednym wskaźnikiem syntetycznym [19, 65, 93]. Według S. Chajtmman'a [19], aby opisać złożoną rzeczywistość przedsiębiorstwa produkcyjnego należy wykorzystywać wskaźniki relacyjne utworzone na podstawie relacji 12 parametrów wpływających na efekty działalności gospodarczej przedsiębiorstwa. W literaturze istnieje szereg różnych miar służących do oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych. Jednak obecnie, niemal powszechnie, w krajach wysoko rozwiniętych przemysłowo za jedno z podstawowych kryteriów oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych uważa się produktywność [35].

3.5 Charakterystyka wybranych wskaźników oceny systemów produkcyjnych

Wskaźniki **produktywności** [71] systemów produkcyjnych określa stosunek wektorów wyjścia do wektorów wejścia, tzn. stosunek wyników działań produkcyjnych do zużytych na ten cel nakładów:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m Y}{\sum_{i=1}^n X} \quad (3.1)$$

Produktywność całkowita systemu produkcyjnego odzwierciedla poziom technologiczny wytwarzania, metody organizacji produkcji i zarządzania, umiejętności zatrudnionych, a także zmiany w nakładach kapitałowych i inne relacje w sferze projektowania, jak i w sferze eksploatacji systemu produkcyjnego.

Jednak tak określona produktywność dla całego systemu produkcyjnego może być niemożliwa do wyznaczenia z uwagi na różnorodność, pociągającą za sobą nieporównywalność, zarówno zasobów wejściowych jak i produktów. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie sum ważonych za pomocą kosztów jednostkowych odpowiednich rodzajów zasobów i cen poszczególnych rodzajów produktów [65] lub innych jednostek umownych czy mierników naturalnych [35].

Oprócz całkowitej produktywności systemów produkcyjnych częste zastosowanie mają wskaźniki cząstkowej produktywności, skupiające się zazwyczaj na pojedynczym nakładzie. Stąd pochodzą cząstkowe wskaźniki produktywności pracy, kapitału, energii, maszyn i urządzeń, powierzchni roboczej, surowców i wiele innych. Tabela 22 przedstawia wybrane przykłady cząstkowych wskaźników produktywności:

Tabela 22. Przykłady wskaźników produktywności cząstkowej [35]

Rodzaj wskaźnika cząstkowego	Przykłady wyrażenia
<i>Produktywność pracy</i>	- liczba wyrobów, wydobytych ton węgla na roboczogodzinę wszystkich grup zatrudnionych z zakładowie (przedsiębiorstwie), - produkcja dodana w zł na roboczogodzinę liczoną jw., - wartość produkcji w zł na jednostkę kosztu pracy wszystkich zatrudnionych, - sprzedaż w zł na jednostkę kosztu pracy liczoną jw.
<i>Produktywność maszyn i urządzeń</i>	- liczba wyrobów, ton stali na dysponowaną maszynogodzinę, - liczba jw. na przepracowaną maszynogodzinę, - wartość produkcji w zł na jednostkę kosztu postoju i pracy maszyn,

<i>Produktywność kapitału</i>	- liczba jednostek wyrobów (ton) na jednostkę nakładu w zł, - wartość sprzedaży na jednostkę nakładu w zł, - wartość spływu gotowej produkcji do magazynu na jednostkę „zamrożonych” środków obrotowych w materiałach i zapasach w danym okresie czasu, - wartość spływu gotowej produkcji do magazynu na jednostkę „zamrożonych” środków trwałych w budynkach, maszynach i urządzeniach oraz instalacjach.
Produktywność energii	- liczba jednostek wyrobów (ton) na 1 kW (mocy zainstalowanej), - liczba jednostek wyrobów (ton) na 1 kWh (mocy zużytej) - liczba jednostek wyrobów na jednostkę opłat za energię, - wartość produkcji na jednostkę zużytego ciepła lub spalonego paliwa stałego czy płynnego.

Wskaźniki produktywności całkowitej są generalnie bardziej miarodajne niż wskaźniki produktywności cząstkowej [35]. Koncentracja na poprawie produktywności jednego czynnika może w konsekwencji spowodować obniżenie produktywności całkowitej poprzez niemożliwość wykorzystania innych czynników, np.: „poprawa produktywności pracy pracowników bezpośrednio zatrudnionych w produkcji może obniżać całkowitą produktywność chociażby poprzez niewykorzystanie będącego w dyspozycji czasu pracy bardzo drogich maszyn i urządzeń produkcyjnych, niewykorzystanie materiałów czy powierzchni produkcji lub infrastruktury energetycznej wydziału, zakładu przemysłowego itp.” [35].

Bardzo istotną zaletą wskaźnika produktywności jest jego uniwersalność, tzn. możliwość odniesienia go do wszelkich rodzajów działalności (produkcyjnej, usługowej, administracyjnej itd.), systemów różnych stopni (gospodarki narodowej, gałęzi, sektora, przedsiębiorstwa, wydziału, gniazda, stanowiska roboczego itd.) jak również do różnego typu elementów wektora wejść i wyjść do systemu (energii, pracy, powierzchni, kapitału, itd.). Wadą wskaźnika produktywności jest jego zmienność, brak powiązania z zadaniem przedziałem czasowym i konieczność stosowania wielu wskaźników produktywności cząstkowej do oceny całego systemu produkcyjnego.

Często wskaźnikiem utożsamianym z produktywnością jest **wydajność**. Wskaźniki te jednak można z sobą utożsamiać tylko do zasobów pracy (np. ludzi, maszyn) i tylko w stosunku do założonego przedziału czasu [65]. Wydajność nazywana jest często również **zdolnością** lub **mocą produkcyjną** [67, 98]. Wydajność jest to maksymalna ilość określonej jakościowo produkcji, jaką mogą wytworzyć w pewnym okresie poszczególne systemy produkcyjne (przedsiębiorstwa, wydziały, linie produkcyjne, gniazda, stanowiska robocze, itd.) w optymalnych warunkach [67].

Z wydajnością ściśle powiązane są dwa inne wskaźniki: stopień wykorzystania zasobów i sprawność. Stopień wykorzystania zasobów jest to wielkość dostępnej zdolności produkcyjnej, która jest rzeczywiście wykorzystywana [98]. Wskaźnik ten określa odsetek wydajności, w którym zasób jest rzeczywiście wykorzystywany w procesie produkcyjnym. Sprawność jest to stosunek aktualnej wielkości produkcji do wielkości możliwej do osiągnięcia [98]:

$$\text{sprawność} = \frac{\text{produkcja rzeczywista}}{\text{wydajność rzeczywista}} \quad (3.2)$$

Innym wskaźnikiem, coraz częściej analizowanym przez przedsiębiorstwa produkcyjne, jest **efektywność**. Efektywność ekonomiczna jest to iloraz efektu osiągniętego i nakładów poniesionych na jego uzyskanie [65]:

$$\text{efektywność} = \frac{\text{wartość efektów}}{\text{wartość nakadów}} \quad (3.3)$$

Z punktu widzenia tej bardzo ogólnej definicji zdefiniowane powyżej pojęcia takie jak produktywność i wydajność są wskaźnikami wydajności ekonomicznej.

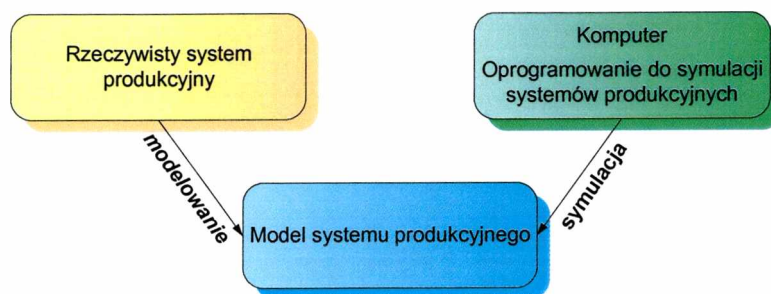
Kolejnym wskaźnikiem podstawowej działalności wytwórczej jest **skuteczność**. Określany jest on jako stopień osiągnięcia przez system założonego celu:

$$\text{skuteczność} = \frac{\text{efekty osiągnięte}}{\text{efekty planowane}} \quad (3.4)$$

3.6 Modelowanie systemów produkcyjnych

Podjęcie decyzji odnośnie do systemu produkcyjnego, z uwagi na jego złożoność, wymaga analizy dużej liczby danych. Złożoność ta, integracja systemu z otoczeniem oraz zakłócenia występujące stale w systemie produkcyjnym utrudniają, a często wręcz uniemożliwiają decydentowi, bezpośrednią identyfikację związków przyczynowo-skutkowych zachodzących w systemie [57]. Podejmowanie decyzji na podstawie jedynie intuicji jest często zawodne i obarczone bardzo dużym ryzykiem.

W tej sytuacji niejednokrotnie konieczne jest budowanie modeli (modelowanie) oraz symulacja systemów produkcyjnych. Wyrażenie „*modelowanie i symulacja*” oznacza zestaw działań związanych z konstruowaniem modeli systemów rzeczywistych i późniejszym symulowaniu ich na komputerze [110]. Komputer nie jest niezbędnym narzędziem do przeprowadzenia symulacji, jednak z uwagi na to, że znacznie ją przyspiesza i pozwala na uwzględnienie dużej liczby danych, jest wykorzystywany powszechnie. Schematycznie powiązanie pomiędzy modelowaniem a symulacją w systemach produkcyjnych przedstawia rysunek 21.



Rys. 21. Podstawowe elementy i relacje modelowania i symulacji systemów produkcyjnych

„Model stanowi odwzorowanie najistotniejszych cech badanego lub projektowanego przedmiotu z punktu widzenia zadania, któremu służy w określonej rzeczywistości lub abstrakcji” [35]. Modelowanie natomiast oznacza „działanie polegające na dobieraniu do oryginału możliwego do przyjęcia zamiennika zwanego modelem, czyli jest to przybliżone odtwarzanie najważniejszych właściwości oryginału” [43].

Różnorodność problemów jakie rozwiązuje się przy pomocy modelowania, prowadzi do powstania wielu kryteriów służących systematyzacji modeli. Najbardziej ogólny podział, sporządzony na podstawie analizy literatury [35, 38, 70], przedstawia tabela 23.

Tabela 23. Ogólny podział modeli

GRUPA	RODZAJ MODELU	OPIS I PRZYKŁADY
I	FIZYCZNE	odwzorowują w odpowiedniej skali i stopniu dokładności pewne cechy umożliwiające prowadzenie analiz i badań, np. model samolotu, budynku
	SCHEMATYCZNE	diagramy, mapy, schematy
	SYMBOLICZNE	oparte na zapisie matematycznym oraz algorytmicznym. Modele matematyczne można podzielić na modele numeryczne oraz analityczne.
II	STATYCZNE	pomijają udział czasu, albo opisują chwilowy stan systemu w pewnym momencie czasu
	DYNAMICZNE	podkreślają zjawisko upływu czasu
III	DETERMINISTYCZNE	wszystkie obiekty mają jednoznacznie ustalone względem siebie matematyczne lub logiczne powiązania; dają całkowicie jednoznaczne rozwiązanie
	STOCHASTYCZNE	część zmienności ma charakter losowy; można uzyskać jedynie uśrednione wyniki

Model może być formalnym przedstawieniem teorii lub też formalnym opisem obserwacji, najczęściej jest jednak ich kombinacją. W szczególności zaś model [38, 56, 109]:

- umożliwia badaczowi sprawdzenie swoich teoretycznych przekonań o systemie, dokonanie na nim doświadczeń, obserwacji oraz wyciągnięcie logicznych wniosków,
- ułatwia zrozumienie systemu,
- skłania do prowadzenia w przyszłości badań szczegółowych,

- przyspiesza wykonanie analizy,
- określa metody testowania pożądanych modyfikacji systemu,
- pozwala, w porównaniu z systemem, na łatwiejsze manipulowanie sobą,
- umożliwia prowadzenie kontroli o wiele większej liczby źródeł zmienności, niż byłoby to możliwe przy bezpośrednim badaniu systemu,
- jest mniej kosztowny.

Dzięki poznaniu procesów produkcyjnych można rozwiązywać problemy praktyczne [35], co w konsekwencji prowadzi do minimalizacji ryzyka związanego z podjęciem decyzji. W praktyce przemysłowej istnieje pewna grupa zagadnień, która wymaga bezpośrednich ocen działania złożonych systemów funkcjonujących w warunkach niepewności lub możliwości wyboru alternatywnych rozwiązań. Zagadnienia te w obecnych warunkach rozwiązywane są poprzez symulację komputerową tworzonych wirtualnie procesów lub systemów produkcyjnych przy użyciu specjalistycznego oprogramowania. Symulacja komputerowa w zakresie projektowania procesów wytwórczych dotyczyć może zagadnień ujmowanych w skali „mikro”, odnosząc się do wytwarzania oraz analizy procesów maszynowych sterujących pracą samodzielnych, autonomicznych maszyn, bądź też w skali „makro”, dotyczy projektowania i analizy organizacyjnej pracy gniazd lub linii produkcyjnych [84]. Dzięki modelowaniu [35, 56]:

- zmniejsza się lub powiększa obiekt badań do dowolnej wielkości,
- analizuje się procesy trudne do uchwycenia ze względu na zbyt szybkie lub zbyt wolne tempo ich przebiegu,
- bada się jeden wybrany aspekt zagadnienia, pomijając inne.

Za główne cele modelowania procesów produkcyjnych można przyjąć [2]:

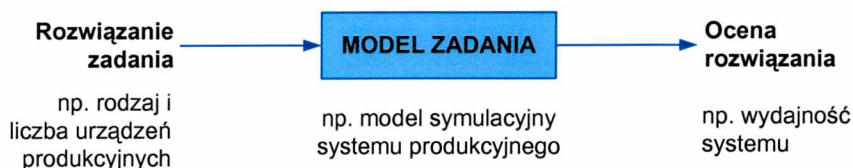
- poznanie struktury i działania obiektów produkcyjnych,
- opracowanie algorytmów umożliwiających poprawę wskaźników jakości procesów wytwórczych,
- prognozowanie wpływu i rodzaju zakłóceń na przebieg produkcji.

Ze względu na istotę czynności ukierunkowanych na podjęcie decyzji bądź ustalenie nieznanых cech lub parametrów systemu produkcyjnego można wyróżnić dwa rodzaje zadań modelowania[70]:

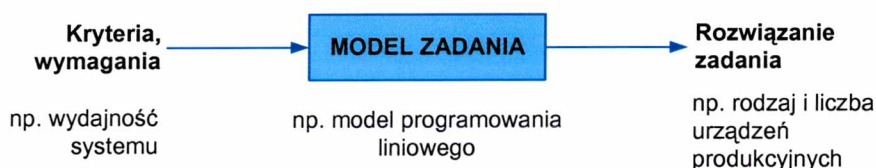
- zadania typu analiza,
- zadania typu synteza.

Zadania typu analiza to takie zadania, w których znając charakterystyki podsystemów i poszczególnych elementów systemu produkcyjnego można wyznaczyć parametry całego systemu produkcyjnego. Są formułowane i rozwiązywane głównie w celu oceny różnych wariantów na różnych etapach projektowania systemów

produkcyjnych. Natomiast zadania typu synteza to takie zadania, w których na podstawie zadanych kryteriów i wymagań dotyczących całego systemu produkcyjnego wyznacza się parametry jego podsystemów i elementów. Są zazwyczaj formułowane i rozwiązywane w celu ustalenia planu produkcji i odnalezienia różnych możliwych wariantów rozwiązań systemów produkcyjnych. Schematy obydwu typów zadań przedstawiają rysunek 22 i rysunek 23.



Rys. 22. Zadanie typu analiza w modelowaniu systemów produkcyjnych [70]



Rys. 23. Zadanie typu synteza w modelowaniu systemów produkcyjnych [70]

Przy podejmowaniu decyzji, analizie i projektowaniu systemów produkcyjnych istnieje konieczność uwzględnienia wielu danych. Również duża liczba możliwych wariantów rozwiązań i ich złożoność uniemożliwiają często podjęcie decyzji optymalnej. Możliwość taką daje analiza symulacyjna systemów produkcyjnych.

3.7 Analiza symulacyjna systemów produkcyjnych

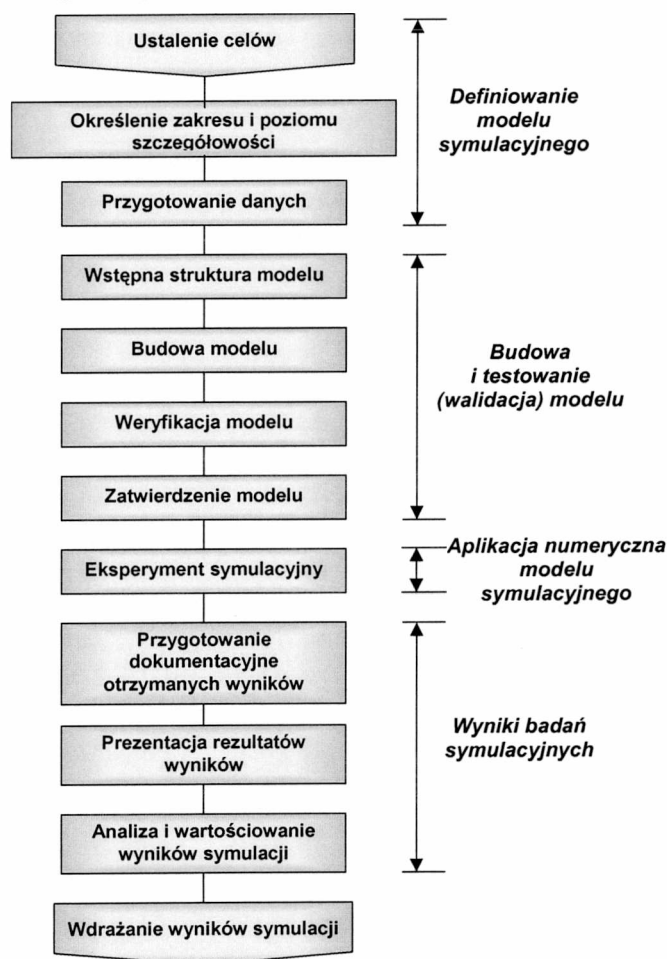
Większość obserwowanych w systemie produkcyjnym zjawisk dynamicznych ma charakter syntetyczny, tzn. są one skumulowanym skutkiem wielu zdarzeń cząstkowych zaistniałych w różnych obszarach struktury i różnych, często znacznie od siebie oddalonych, chwilach [89]. Jeśli podejmujący decyzję podejmie ją jedynie na podstawie obserwacji bezpośredniej takiego systemu, to istnieje duże prawdopodobieństwo, że decyzja ta obciążona będzie błędem, a jej podjęcie dużym ryzykiem.

Pomocne w tej sytuacji mogą być zintegrowane systemy informatyczne (ZSI) oraz oprogramowanie do komputerowej symulacji i optymalizacji systemów produkcyjnych. ZSI służą głównie do dostarczania informacji na temat stanu systemu produkcyjnego, natomiast dzięki pakietom symulacyjnym można przeanalizować skutki podjętych decyzji i dzięki temu zminimalizować ryzyko.

„Symulacja jest techniką służącą do dokonywania eksperymentów na pewnych rodzajach modeli, które opisują zachowanie się złożonych systemów w pewnych okresach

czasów” [36]. Inna definicja przedstawia symulację jako „*formę eksperymentowania na modelu komputerowym (symulacyjnym) dostarczającą odpowiedzi na pytanie, jak analizowany system będzie się zachowywał w określonej sytuacji*” [63]. Traktowanie modelu jako duplikatu systemu rzeczywistego pozwala m. in. na przenoszenie wniosków z badań na modelu komputerowym na system, zgodnie z zasadami budowy modeli. Dlatego symulacja może być rozumiana również jako „*badanie przyszłych skutków decyzji podejmowanych obecnie, w danych, konkretnych, warunkach*” [63]. Oznacza to, że na podstawie opracowanego modelu otrzymuje się pośrednio odpowiedź na pytanie, w jakim stopniu uzasadnione są oczekiwania, oparte na teoretycznych założeniach, co do określonego typu decyzji/działań/czynności.

W procesie symulacji odtwarzane są następujące po sobie fragmenty (stany) przebiegu modelowanego procesu (zachowania systemu) w kolejności zgodnej z upływem czasu. Schemat przebiegu eksperymentu symulacyjnego przedstawia rysunek 24.



Rys. 24. Przebieg eksperymentu symulacyjnego [63]

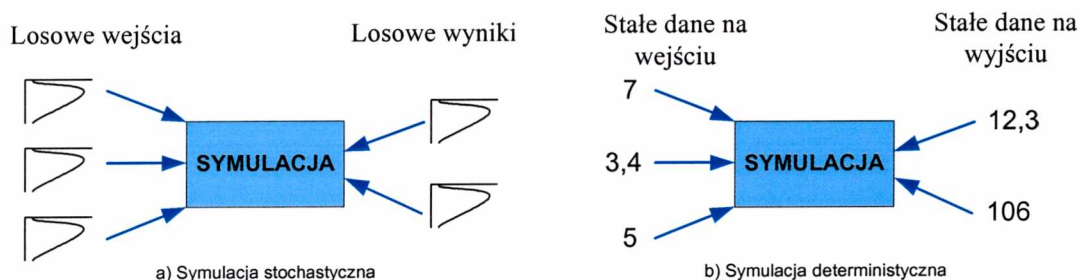
Sposób w jaki działa symulacja zależy przede wszystkim od jej rodzaju. Trzy najczęściej spotykane w literaturze [1, 2, 13, 40, 44, 91] klasyfikacje symulacji to:

- symulacja statyczna lub dynamiczna,

- symulacja stochastyczna lub deterministyczna,
- symulacja dyskretna lub ciągła.

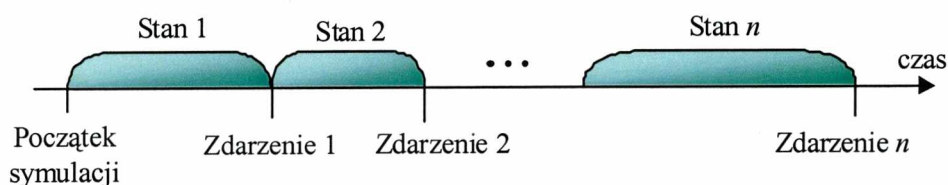
Symulacja statyczna (nazywana również metodą symulacji Monte Carlo opisana w rozdziale 1) nie uwzględnia przebiegu zjawisk w czasie. Dane do symulacji pochodzą często z badań statystycznych. **Symulacja dynamiczna**, w przeciwieństwie do statycznej, uwzględnia przebieg procesu w czasie. Opisuje zmieniające się w czasie zachowanie modelowanego systemu [1].

Symulacja stochastyczna opiera się na procesach stochastycznych, to znaczy takich, które zbudowane są z sekwencji losowej z generowanych wartości [44]. Symulacja stochastyczna odnosi się do symulacji, w której jedna lub więcej zmiennych wejściowych są przypadkowe. Symulacja stochastyczna generuje wynik, który sam w sobie jest przypadkowy, dlatego, aby dokonać właściwej oceny wyników, trzeba przeprowadzić kilka losowych prób, gdyż każda próba różni się od siebie statystycznie. Natomiast **symulacja deterministyczna** nie wykorzystuje losowych zdarzeń [44]. Oznacza to, że przebieg eksperymentu symulacyjnego nie podlega prawdopodobieństwu. Symulacja deterministyczna ma przewidywalne wejścia i daje przewidywalne wyniki. Symulacja deterministyczna będzie zawsze dawała dokładnie taki sam wynik, bez względu na to, jak często jest przeprowadzana. Różnice między symulacją stochastyczną i deterministyczną przedstawia rysunek 25.



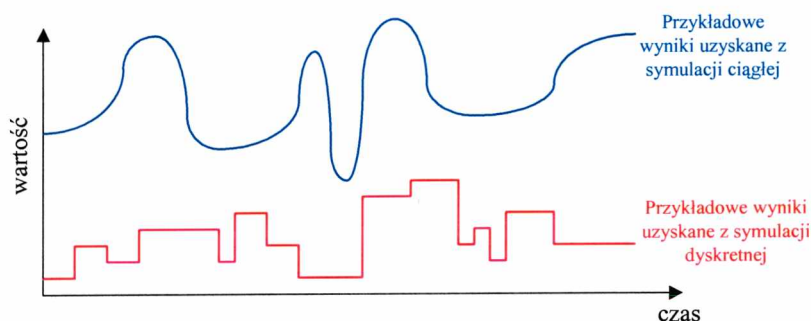
Rys. 25. Różnice pomiędzy symulacją stochastyczną (a) a deterministyczną (b) [71]

Symulacja dyskretna jest symulacją, w której zmiany pojawiają się w określonych punktach czasu [44]. Zmiany w modelu pojawiają się w momencie wystąpienia pewnych zdarzeń. Większość systemów wytwórczych jest modelowana za pomocą symulacji dyskretniej. Przykład zmian zachodzących w modelu podczas eksperymentu za pomocą symulacji dyskretniej przedstawia rysunek 26.



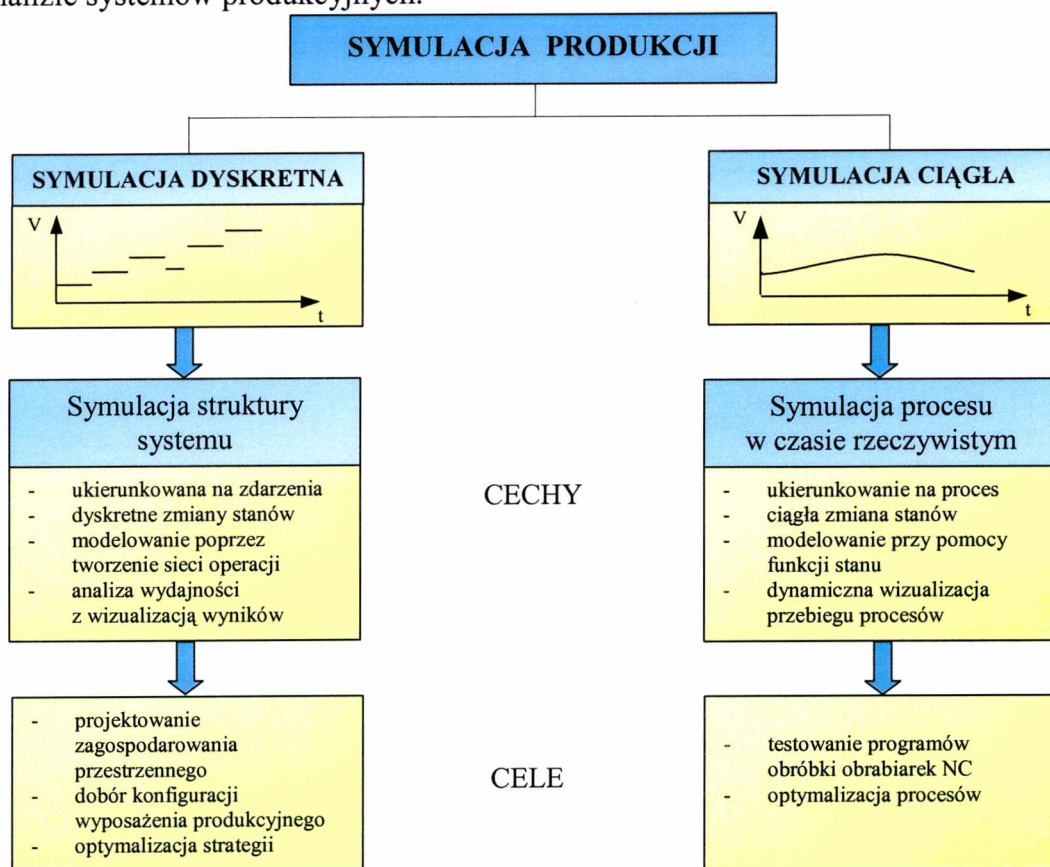
Rys. 26. Przykład zmian podczas eksperymentu za pomocą symulacji dyskretniej [44]

W **symulacji ciągłej** zmiany następują ciągle w odniesieniu do czasu. Symulacja jest ciągła, jeżeli wartości przyjmowane przez zmienne opisowe mogą być przedstawione za pomocą liczb rzeczywistych lub ich przedziałów. Modele ciągłe są opisywane poprzez równania różniczkowe. W praktyce trudno jest znaleźć system, którego zdarzenia byłyby całkowicie ciągłe, czy całkowicie dyskretne, zazwyczaj jednak można stwierdzić, która z charakterystyk (ciągła czy dyskretna) dominuje w badanym systemie. Przykład wyników uzyskanych za pomocą symulacji ciągłej i dyskretnej przedstawia



Rys. 27. Porównanie wyników uzyskanych z symulacji ciągłej i dyskretnej [44]

Procesy produkcyjne mają charakter ciągły lub dyskretny. Z tego powodu większość pakietów symulacyjnych łączy w sobie obydwie metody symulacji: ciągłej i dyskretnej. Rysunek 28 przedstawia porównanie symulacje w kontekście zastosowania w analizie systemów produkcyjnych.



Rys. 28. Modelowanie symulacyjne dyskretne i ciągłe systemów produkcyjnych [91]

Modele symulacyjne umożliwiają kompleksowe podejście do badania własności systemów produkcyjnych, gdyż pozwalają na łączenie różnych technik i metod modelowania. W porównaniu z metodami analitycznymi, pozwalają one na badanie systemów produkcyjnych w złożonych, spotykanych w rzeczywistości, sytuacjach. Dzięki temu wyniki uzyskiwane za ich pomocą mają większe znaczenie praktyczne.

Z drugiej jednak strony należy zaakceptować fakt, że stworzony model nigdy dokładnie nie opisze skomplikowanego systemu rzeczywistego. Dlatego tworzenie modelu jest dużą sztuką i wymaga dużego doświadczenia, pomocnego w wyborze odpowiednich elementów i parametrów do modelowania. przedstawia wady i zalety stosowania symulacji [1, 2, 35, 40, 62, 91]

Tabela 24. Wady i zalety stosowania symulacji

ZALETY STOSOWANIA SYMULACJI	WADY STOSOWANIA SYMULACJI
1. Symulacja pozwala na ustalenie postaci modelu decyzyjnego za pomocą eksperymentów bezpośrednio przeprowadzonych na badanym procesie. 2. Może być stosowana do analizy dużych i złożonych problemów decyzyjnych, które nie mogą być rozwiązane za pomocą innych metod (np. badań operacyjnych). 3. Pozwala na szybkie przygotowanie decyzji dzięki analizie efektów eksperymentów przeprowadzonych dla wielu, następujących po sobie, okresów czasu. 4. Dostarcza odpowiedzi na pytanie typu "co, jeśli ...?". Eksperymenty symulacyjne umożliwiają przebadanie różnych alternatyw decyzyjnych. 5. Pozwala na analizę współzależności efektów składowych zmiennych modelu mających wpływ na wybór decyzji w warunkach ekstremalnych.	1. Dobre modele symulacyjne są drogie, a ich przygotowanie zabiera dużo czasu. 2. Każdy model symulacyjny ma charakter unikatowy. Jego rozwiązania nie mogą być wykorzystywane do analizy innych problemów decyzyjnych. 1. Pozwala przygotować alternatywne rozwiązania decyzyjne w kolejnych eksperymentach, ale nie są to rozwiązania optymalne dla każdych warunków. 2. Modele symulacyjne generują odpowiedzi na pytania odnoszące się do konkretnych i zmiennych warunków. Decydent przygotowujący decyzje musi uwzględnić wszystkie uwarunkowania i ograniczenia analizowanych wariantów decyzyjnych. 3. Charakteryzuje się pracochłonnością budowy, programowania i poprawiania programów symulacyjnych 4. Konieczność żmudnego opracowywania wyników. 5. Konieczność biegłego posługiwania się językami symulacji i zatrudnienia specjalistów dogłębnie znających modelowane obiekty

Rozdział 4. Niezawodność i ryzyko jako cecha systemu produkcyjnego

Zdefiniowano system produkcyjny w ujęciu teorii systemów oraz przedstawiono podstawowe zagadnienia teorii niezawodności. Zaproponowano włączenie podstawowych charakterystyk niezawodnościowych do systemu analiz procesów produkcyjnych. Pozwoliło to na wykazanie związku niezawodności i ryzyka jako synonimu zawodności systemu produkcyjnego. Omówiono podstawowe typy struktur niezawodnościowych systemów oraz zilustrowano je przykładami odpowiednimi dla systemów produkcyjnych.

Przedstawiony w rozdziale pierwszym stan wiedzy na temat metod analizy i oceny ryzyka pokazuje, że jest on niewystarczający do wyznaczenia ryzyka systemu produkcyjnego. Proponowane w literaturze metody wymagają dostosowania problemu do ich możliwości, ograniczeń i wymagań. Również klasyczne definicje ryzyka nie oddają w pełni specyfiki ryzyka systemu produkcyjnego. Rozwiązaniem tych problemów może być przedstawienie systemu produkcyjnego w ujęciu teorii systemów i zastosowanie w ocenie ryzyka ogólnej teorii niezawodności.

W myśl teorii systemów „System jest pewną całością, w której współdziałają wyodrębnione części składowe. Funkcjonowanie systemu zależy od funkcji części składowych i związków między nimi. Powiązania części składowych określają strukturę systemu. O systemach mówimy tylko wtedy, gdy całość została zorganizowana i ma realizować określony cel rozłożony na podcele dla poszczególnych części.” [13]. Części składowe nazywane są często komponentami, elementami, obiektami, podsystemami lub członami. Każdy system można zdefiniować za pomocą modelu. Z kolei teoria niezawodności to „dziedzina nauki stosowanej, zajmująca się badaniem i projektowaniem obiektów (elementów, systemów) z punktu widzenia spełniania przez nie zadanych wymagań (w ciągu danego czasu, w określonych warunkach)” [75]. Przeniesienie użytych w definicji pojęć „obiekt”, „element”, „system” oraz „spełnienie wymagań” na grunt systemów produkcyjnych daje nowe możliwości w zastosowaniu teorii niezawodności do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Celem istnienia każdego systemu gospodarczego, w tym również produkcyjnego, jest spełnianie zadanych wymagań (celów, funkcji), a wówczas ryzyko systemu produkcyjnego można potraktować jako zawodność w „spełnieniu wymagań”, czyli odwrotność niezawodności.

Takie podejście do oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych i systemu produkcyjnego wydaje się znacznie bardziej korzystne z uwagi na możliwość budowy modelu uwzględniającego potrzeby badawcze poprzez dowolną dekompozycję systemu

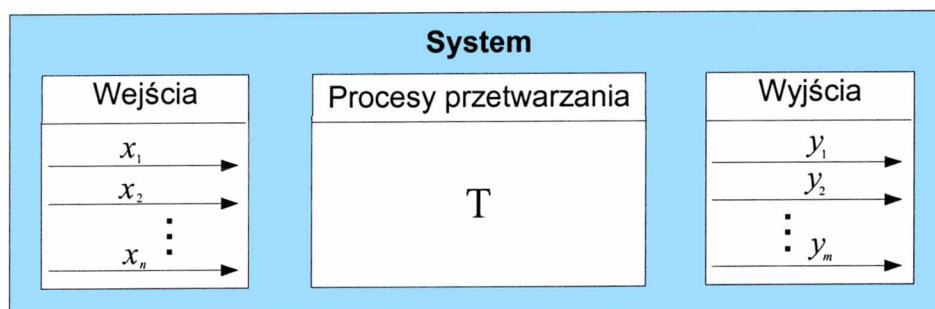
lub podziałowi go na wybrane etapy. W efekcie, oprócz wyznaczenia wielkości, ryzyka będzie można również je zlokalizować w systemie.

4.1 System w ujęciu teorii systemów

Proponowane w literaturze modele systemów są różnie definiowane przez poszczególnych autorów [7, 13, 35, 36, 71, 106], jednak zawsze w modelu systemu występują następujące trzy składowe:

- wejścia [WE],
- wyjścia [WY],
- przebiegający w nim proces transformacji [T], w wyniku którego następuje przekształcenie, wg określonej kolejności, elementów wejścia w elementy wyjścia.

Schemat systemu przedstawia rysunek 29.



Rys. 29. Ogólny schemat systemu

System może mieć więcej niż jedno wejście i wyjście. Stan wszystkich n wejść i wszystkich m wyjść można określić poprzez parametry lub wektory:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (4.1)$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \quad (4.2)$$

Sposób działania systemu polega na tym, że do systemu zostaje wprowadzony bodziec, czyli pewien stan wejścia określony parametrem (lub wektorem) x , a wydostaje się reakcja, czyli inny stan określony parametrem (lub wektorem) y . Ta zmiana stanu (przekształcenie) spowodowana jest transformacją T , co można zapisać w postaci:

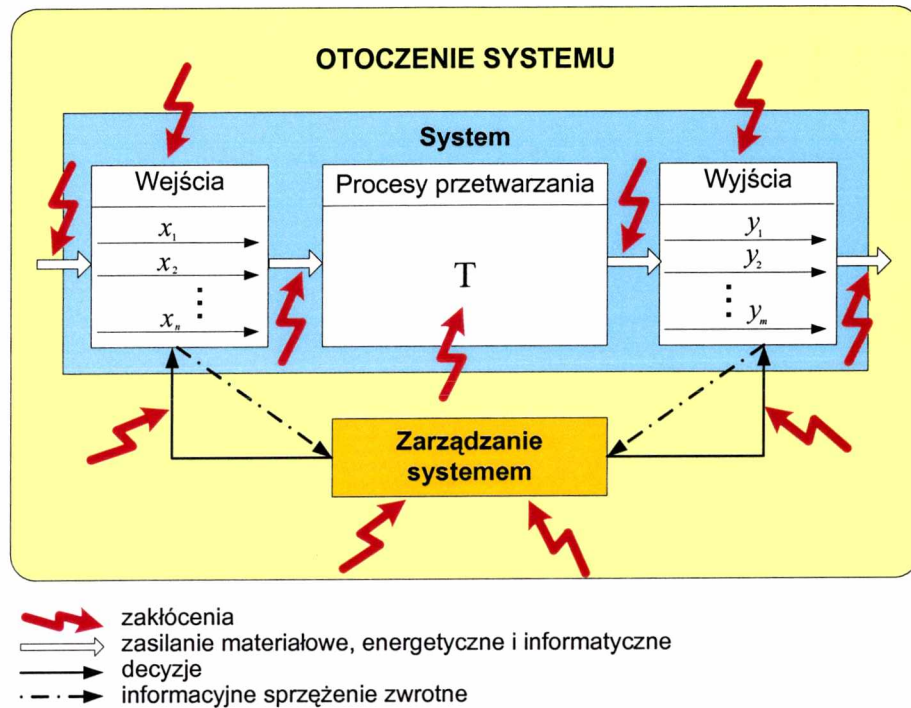
$$y = T(x) \quad (4.3)$$

Dodatkowymi składowymi systemu, spotykanymi w literaturze, są:

- funkcja (cel) albo zadanie stanowiące podstawę jego istnienia [13, 71],
- otoczenie, będące zbiorem obiektów nie należących do systemu, ale mające na niego wpływ [71],

- zasilanie, czyli sprzężenia materialne, energetyczne i informacyjne zachodzące pomiędzy składowymi systemu [7, 35, 106],
- zakłócenia [13],
- proces zarządzania systemem [7, 35].

Rozszerzony o opisane powyżej elementy schemat systemu przedstawia rysunek 30.

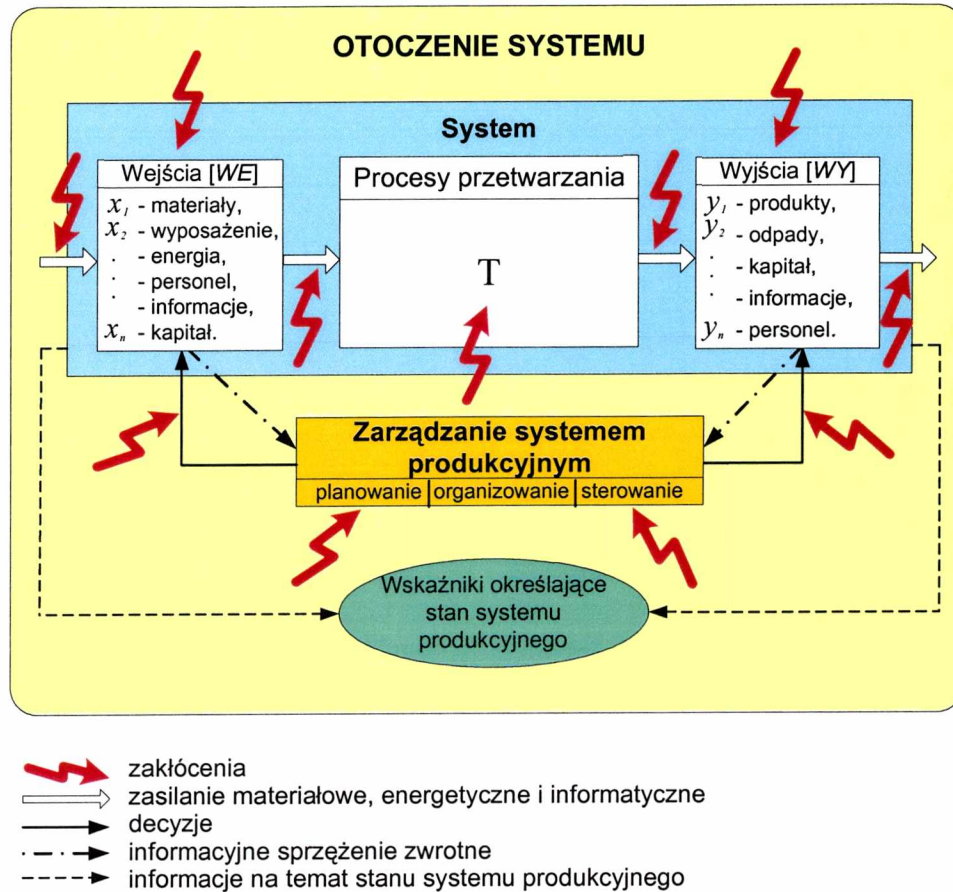


Rys. 30. Rozszerzony schemat systemu

Budowa modelu oraz liczba i poziom szczegółowości poszczególnych składowych powinna zależeć od problemu badawczego, dla którego system taki jest analizowany [13].

4.2 System produkcyjny w ujęciu teorii systemów

Zgodnie z założeniami teorii systemów system (proces) produkcyjny można przedstawić jako „... celowo zaprojektowany i zorganizowany układ materialny, energetyczny i informacyjny eksploatowany przez człowieka i służący produkowaniu określonych produktów (wrobów lub usług) w celu zaspokajania różnorodnych potrzeb konsumentów.” [35]. Oznacza to, że systemem może być układ komórek produkcyjno – administracyjnych z dowolnego poziomu struktury produkcyjnej, czyli np. stanowisko robocze, komórka produkcyjna pierwszego stopnia, komórka produkcyjna stopnia drugiego itp. aż do komórki stopnia n -tego [106]. Systemem mogą być również poszczególne procesy produkcyjne, dowolnie dekomponowane [7]. Schemat systemu, w ujęciu teorii systemów, przedstawia rysunek 31.



Rys. 31. Schemat systemu produkcyjnego

W tak zdefiniowanym systemie produkcyjnym można wyróżnić następujące elementy:

1. wektor wejścia x [WE], który stanowią wszystkie czynniki produkcji;

Do elementów wektora wejścia można zaliczyć [35] środki techniczne produkcji, przedmioty pracy, czynnik ludzki, informacje, kapitał.

2. wektor wyjścia y [WY], który stanowią wszystkie elementy wychodzące z systemu, a więc w przypadku procesu produkcyjnego będą to wyroby, usługi i odpady produkcyjne;

Do elementów wektora wyjścia należą [35]: wyroby przemysłowe, usługi produkcyjne, braki produkcyjne i surowce wtórne, szkodliwe odpady zanieczyszczające środowisko, hałas, informacje o jakości wyrobu, o faktycznym koszcie własnym, o stanie procesu produkcyjnego, doświadczenie produkcyjne załogi i inne informacje wyjściowe z systemu lub pozostające w tym systemie dla następnych cykli produkcyjnych.

3. proces transformacji (przetwarzania) [T], przetwarzający wektor wejścia w wektor wyjścia;

W systemach produkcyjnych procesem transformacji jest proces produkcyjny, na który składają się operacje technologiczne, kontrolne, transportowe i magazynowe [35]. Transformację można traktować również jako zbiór przejść, przekształceń lub zmian dokonywanych w pewnym zbiorze przedmiotów lub ogólniej, elementów wchodzących w skład systemu [106].

3. funkcja (cel) albo „zadane wymagania”, dla realizacji których system istnieje;

Współczesna literatura wymienia trzy podstawowe cele organizacji i funkcjonowania systemów produkcyjnych [35]:

- jakość i nowoczesność produktów,
- wzrost produktywności,
- obniżka kosztów własnych wytwarzania.

4. otoczenie, na które mogą składać się inne obiekty lub systemy nie należące do rozpatrywanego systemu, ale mające wpływ na system produkcyjny;

5. sprzężenia materialne (zasilanie), energetyczne i informacyjne pomiędzy poszczególnymi elementami systemu oraz otoczeniem systemu;

Sprzężenia materialne w systemie produkcyjnym powinny umożliwić efektywny przepływ materiałów i półwyrobów, od magazynów wejściowych do magazynów wyrobów gotowych, a nawet do użytkownika produkowanych wyrobów [35]. Zasilenie, bez względu na jego postać, zawsze jest przedmiotem sterowania, gdyż informacja jest zawsze czynnikiem umożliwiającym sterowanie systemem [106].

6. zakłócenia;

Tak jak w przypadku innych obiektów, na każdy element procesu produkcyjnego również wpływają zakłócenia. Zakłócenia te są najczęściej nieznanymi wejściami do systemu produkcyjnego o nieznanych wartościach [61]. Z uwagi na ich nieprzewidywalny charakter mają charakter losowy. Wielkość wpływu zakłóceń na stopień „spełnienia wymagań” postawionych systemowi będzie oznaczało stopień zawodności systemu.

7. proces zarządzania systemem;

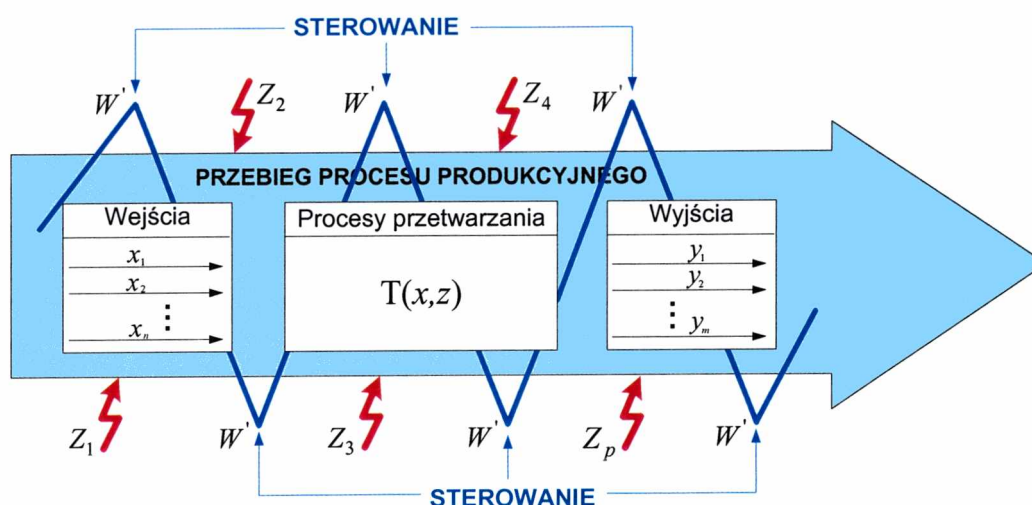
Poprzez zarządzanie rozumie się zwykle „*sterowanie lub kierowanie złożonymi czynnościami, w których realizacji uczestniczą ludzie i różne środki materialne* [13]”.

Istotą sterowania procesem produkcji są wszystkie celowe działania zmierzające do doprowadzenia (lub utrzymania) procesu produkcji do określonej normy (wzorca), która może być wektorem różnych parametrów [107]. Normy lub wzorce określone są w procesie zarządzania poprzez wartościowe określenie różnego typu wskaźników (porównaj punkt 3.4).

4.3 Zarządzanie systemem produkcyjnym

Z punktu widzenia niniejszej pracy zagadnienie zarządzania systemem produkcyjnym, sprowadzające się do podejmowania decyzji, jak i stale występujące w nim zakłócenia, wymagają szerszego omówienia. W każdym prawidłowo zaprojektowanym systemie, o ile wejścia do systemu są prawidłowe a system odpowiednio zarządzany, wyjścia systemu powinny spełniać postawione przed systemem wymagania [7]. Inaczej można stwierdzić, że wyjścia z systemu są niezgodne z oczekiwaniami, a system jest zawodny. Przeciwdziałać temu powinno zarządzanie systemem.

Na zarządzanie, w podejściu funkcjonalnym, składają się następujące funkcje: planowanie, organizowanie, sterowanie (motywowanie) i kontrola. W praktyce produkcyjnej zarządzanie systemem produkcyjnym polega na ustaleniu planów działań (funkcja planowania) umożliwiających osiągnięcie wyznaczonych celów oraz taka organizacja systemu produkcyjnego, aby cele te były możliwe do zrealizowania (funkcja organizowania). W planach określone są wartości wskaźników, które powinny charakteryzować prawidłowy przebieg procesów produkcyjnych. Porównywanie wyników realizacji z planowanymi (funkcja kontroli) stanowi podstawę do interwencji regulacyjnej, polegającej na podjęciu decyzji (funkcja sterowania). W ten sposób następuje korygowanie odchyleń wyznaczonych wskaźników od przyjętego planu. Proces ten przebiega w sposób ciągły. Na rysunku 32 schematycznie przedstawiono ideę sterowania parametrami procesu produkcyjnego.



Rys. 32. Schemat idei sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego

Zarządzanie w ujęciu teorii systemów polega na podejmowaniu decyzji w oparciu o wielkości charakterystyczne dla jego modelu. Wielkości te można podzielić na trzy grupy [13]:

- wielkości zarządzające (decyzyjne), czyli wielkości wejściowe $x_1, x_2, \dots, x_n$, które wpływają na wartości wyjść. Podjęcie decyzji oznacza wybór odpowiednich wartości tych wielkości, a realizacja tych decyzji, czyli „podawanie” na wejściu obiektu wyznaczonych wartości x , służy realizacji celu zarządzania,
- wielkości wyjściowe $y_1, y_2, \dots, y_m$ związane z celem zarządzania,
- zakłócenia $z_1, z_2, \dots, z_r$, czyli wielkości które również mają wpływ na wyjścia y i które charakteryzują oddziaływanie otoczenia na proces produkcyjny. Zmiany tych wielkości powodują konieczność przeciwdziałania w postaci odpowiednich zmian wejść x .

W przypadku gdy występują pojedyncze wielkości x, y, z , tzn. $n = m = r = 1$, to wówczas statyczny model takiego procesu można opisać funkcją określającą wpływ x i z na y za pomocą wzoru [13]:

$$y = T(x, z) \quad (4.4)$$

4.4 Niezawodność systemu

Termin **niezawodność** ma wiele interpretacji. Jednak najczęściej spotykana w literaturze definicja niezawodności obiektów [7, 9, 11, 56, 81, 85, 86] oznacza „*zdolność obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach i w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne*”. Określenie „wypełnienie wymaganych funkcji” oznacza cel lub zadanie, jakie obiekt powinien spełniać. Stopień spełnienia tego celu, czyli stopień niezawodności obiektu, powinien być określony poprzez wybór odpowiednich wskaźników oraz wartościowe określenie ich wielkości. Powinien być również dostosowany do celu analizy niezawodności obiektu.

Prawdopodobieństwo tego, że obiekt jest w stanie **niezawodności** (N), czyli zdolności do wypełnienia wymaganych funkcji w danych warunkach i w ustalonym przedziale czasu $(0, t)$ określone jest ogólną zależnością [85]:

$$P_N(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(u) du \right], \quad (4.5)$$

gdzie $\lambda(u)$ - intensywność uszkodzeń w chwili $t = u$.

W definicji tej zarówno pojęcia „obiekt” jak i „wypełnienie wymaganych funkcji” mogą być różnie rozumiane w zależności od przedmiotu analizy, co powoduje, że definicję niezawodności można traktować uniwersalnie. Spowodowane jest to definicją **obektu** oznaczającą „*dowolny prosty lub złożony układ, np. element, przyrząd, system, podsystem,*

jednostkę funkcjonalną, urządzenie, stanowiący przedmiot rozważania związany z rozwiązywaniem określonego problemu” [81]. Dzięki takiej definicji obiektu „wypełnienie wymaganych funkcji” przez obiekt jest zdeterminowane typem tego obiektu, co powoduje uniwersalność definicji niezawodności i możliwość odniesienia jej do innych obiektów niż obiekty techniczne, np. systemów i procesów produkcyjnych [75, 81].

Niezawodność (N) często jest utożsamiana w literaturze z gotowością [9, 11, 81, 86] i oznacza „zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: trwałość, nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi” [81]. Podstawową miarą gotowości jest funkcja gotowości ($K_g(t)$), definiowana jako „prawdopodobieństwo, że obiekt jest w stanie spełnić wymaganą funkcję w danych warunkach w dowolnie wybranym przedziale czasu” [81]. Współczynnik gotowości w funkcji czasu określany jest jako [81]:

$$k_g(t) = P \quad (4.6)$$

co oznacza, że obiekt jest zdalny w chwili t , lub inaczej że [7]:

$$k_g(t) = P[L(t) = 1], \quad (4.7)$$

gdzie:

$L(t) = 1$ oznacza, że obiekt w chwili t znajduje się w stanie pracy,

$L(t) = 0$ oznacza, że obiekt w chwili t znajduje się w stanie awarii.

W praktyce często określana jest tzw. wartość stacjonarna współczynnika gotowości k_g^s i wówczas określany jest on jako [7]:

$$k_g^s = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (4.8)$$

gdzie:

T_1 - średni czas pracy obiektu,

T_2 - średni czas odnowy obiektu.

Trwałość (TR) [81] obiektu jest określana przez „czas, który upływa od rozpoczęcia do zakończenia jego eksploatacji”. Oznacza to, że zdolność obiektu do wykonania wymaganych funkcji może być przerywana uszkodzeniami i przywracana naprawami, a zakończenie okresu użyteczności jest określone przez osiągnięcie stanu granicznego. **Nieuszkodzalność** (NU) [81] „charakteryzuje zdolność obiektu do wypełnienia wymaganych funkcji (do poprawnego działania nie przerwanego uszkodzeniem) w danych warunkach w danym przedziale czasu”. Natomiast **obsługiwalność** (OB) [81] określa „zdolność obiektu do utrzymywania lub odtwarzania w danych warunkach eksploatacji stanu, w którym może on wypełniać wymagane funkcje

przy założeniu, że obsługa jest wykonywana w przyjętych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków”.

Miary gotowości obiektu są powiązane funkcyjnie z miarami nieuszkodzalności [81]:

- jeżeli obiekt jest nienaprawialny, to:

$$k_g(t) = NU(t) \quad (4.9)$$

- jeżeli obiekt jest naprawialny, to gotowość obiektu w przedziale czasu $[t, t + \Delta t]$ oznacza prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdalny w chwili t i nie ulegnie uszkodzeniu w przedziale $[t, t + \Delta t]$ lub że obiekt jest uszkodzony w chwili t i zostanie naprawiony w przedziale $[t, t + \Delta t]$. Przy założeniu, że intensywność uszkodzeń λ i intensywność napraw μ są stałe to wówczas:

$$k_g(t + \Delta t) = (k_g(t)(1 - \lambda\Delta t) + (1 - k_g(t))\mu\Delta t) \quad (4.10)$$

Zatem średni współczynnik gotowości jest równy udziałowi czasu zdalności w czasie eksploatacji:

$$k_r(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (4.11)$$

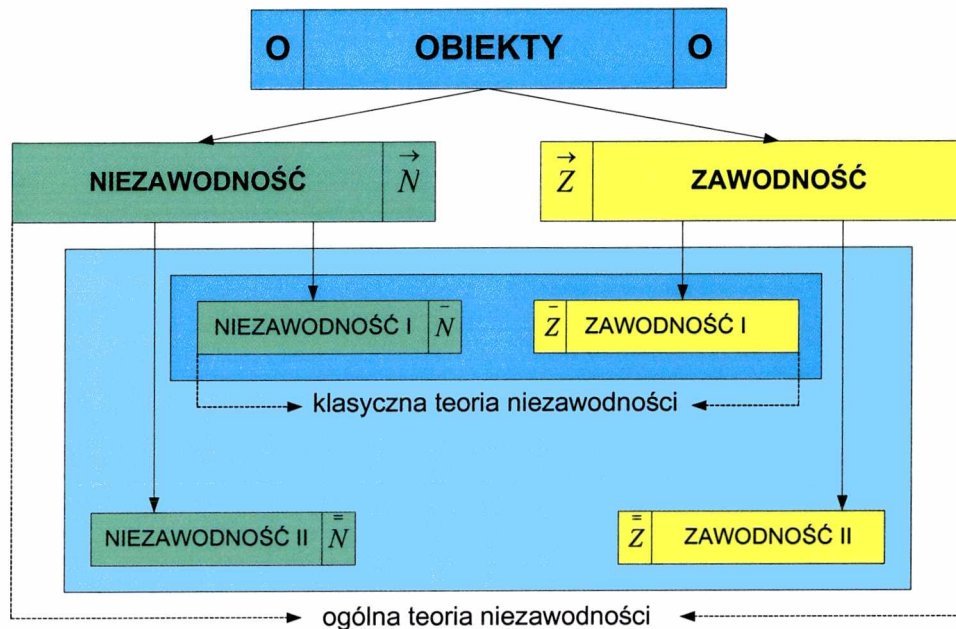
4.5 Niezawodność systemów produkcyjnych

Przeniesienie na grunt systemów produkcyjnych teorii niezawodności może przynieść wiele korzyści w planowaniu i ocenie ryzyka systemów produkcyjnych, jednak wymaga zdefiniowania określonego podejścia do procesu produkcyjnego oraz do niezawodności.

Sama teoria niezawodności rozpatruje w zasadzie stany 0/1, to jest działania czy też braku działania [56, 75]. Takie podejście odnosi się do obiektów technicznych, jednak nie nadaje się do opisu obiektów biotechnicznych czy też systemów eksploatacyjnych, a więc i systemów (procesów) produkcyjnych. Fakty te doprowadziły do powstania tzw. „ogólnej teorii niezawodności”, której koncepcje można spotkać m. in. w pracach [6, 7, 9, 58, 64, 74].

Ogólna teoria niezawodności zakłada, że dla każdego obiektu niezawodność $\bar{N}$ jest wektorem o składowych $\bar{N}$ oznaczającym niezawodność I-go rodzaju oraz $\bar{N}$ oznaczającym niezawodność II rodzaju. Analogicznie również zawodność $\bar{Z}$ jest wektorem o składowych zawodności I rodzaju - $\bar{Z}$ i zawodności II-go rodzaju $\bar{Z}$. Niezawodność I-go rodzaju oznacza wykonanie przez obiekt działania pożądanego, czyli zgodnego z intencjami użytkownika. Niezawodność II-go rodzaju oznacza pożądaną przez użytkownika brak działania. Odpowiednio, brak działania pożądanego nazywa się

zawodnością I-go rodzaju, natomiast działanie niepożądane (niezgodne z intencjami użytkownika) oznacza zawodność II-go rodzaju. Podobieństwa i różnice pomiędzy niezawodnością klasyczną a ogólną przedstawia rysunek 33.



Rys. 33 Związki klasycznej i ogólnej teorii niezawodności [75]

Ogólna teoria niezawodności inaczej jak teoria klasyczna definiuje niezawodność obiektu. „Obiektem niezawodnym jest taki obiekt, który działa zgodnie z intencjami użytkownika, natomiast obiektem zawodnym dla użytkownika jest każdy obiekt, który funkcjonuje (działa) niezgodnie z intencjami użytkownika” [75]. Tak zdefiniowaną niezawodność i zawodność obiektu można przenieść na grunt systemu lub procesu produkcyjnego. Wówczas można stwierdzić, że system (proces) produkcyjny będzie niezawodny, jeśli będzie osiągał założone przez użytkownika wskaźniki, parametry i inne charakterystyki, w przeciwnym razie można mówić o zawodności systemu (procesu) produkcyjnego.

Specyfika dzisiejszych systemów produkcyjnych, a w szczególności ich złożoność, pozwala je traktować jako systemy eksploatacyjne i wówczas niezawodność jest jedną z ich cech mierzona poprzez stopień realizacji wyznaczonych wskaźników, parametrów i charakterystyk. Z drugiej strony systemy, produkcyjne muszą funkcjonować w otoczeniu, które w sposób ciągły oddziałuje na system i powoduje jego zakłócenia. To sprawia, że niezawodność w warunkach rzeczywistych ma charakter losowy [7, 75].

Wobec powyższego niezawodność systemów produkcyjnych można wyznaczać w bardzo elastyczny sposób, przyjmując, w zależności od potrzeb analizy, za „działanie zgodne z intencjami użytkownika” wielkość dowolnego wskaźnika, którym proces według „użytkownika” powinien się charakteryzować. Do najczęściej analizowanych wskaźników procesu produkcyjnego należą [35, 59, 65, 71]:

- czas trwania procesu (t),
- wydajność (W),
- produktywność (P).

Wówczas prawdopodobieństwo, że analizowany parametr będzie nie mniejszy niż planowany, czyli niezawodność procesu produkcyjnego można wyznaczyć analogicznie ze wzorów:

$$N = P(t_{pl} \leq t_{rz}), \quad (4.12)$$

$$N = P(W_{pl} \leq W_{rz}), \quad (4.13)$$

$$N = P(P_{pl} \leq P_{rz}), \quad (4.14)$$

gdzie:

W_{pl} - wielkość planowana analizowanego wskaźnika,

W_{rzecz} - wielkość rzeczywista analizowanego wskaźnika.

4.6 Związek niezawodności i ryzyka

Zagadnienia niezawodności to tradycyjnie problemy związane z funkcjonowaniem obiektów technicznych i termin ten bardzo rzadko odnosi się do systemów gospodarczych lub ekonomicznych. Natomiast w literaturze ekonomicznej występuje szerokie zainteresowanie ryzykiem. Ponieważ w myśl teorii systemów system może odnosić się zarówno do obiektów technicznych jak i ekonomicznych lub gospodarczych, to wydaje się zasadnym przeniesienie na grunt ekonomii ogólnej teorii niezawodności oraz zastosowanie jej w analizie i ocenie ryzyka. Szczególnie dobrym wydaje się obszar systemów produkcyjnych, w których określona technologia uniemożliwia potraktowanie ryzyka według podejścia amerykańskiego, a jedynie jako możliwość wystąpienia efektów (zysków) mniejszych od spodziewanych (tzw. podejście niemieckie).

Przeniesienie ogólnej teorii niezawodności na grunt systemów produkcyjnych może się odbyć poprzez potraktowanie zawodności (Z) - przeciwieństwa niezawodności - jako synonimu ryzyka (R) [7]:

$$R = Z \quad (4.15)$$

Tak zinterpretowane ryzyko (zawodność) systemu (np. produkcyjnego) będzie prawdopodobieństwem tego, że system nie będzie spełniał funkcji, dla których został zaprojektowany lub będzie oznaczać prawdopodobieństwo wystąpienia strat w tym systemie. Dla takiej interpretacji powinno być prawdziwe równanie:

$$N + Z = 1 \quad (4.16)$$

Równanie to oznacza, że prawdopodobieństwo tego, że system jest w stanie niezawodności lub zawodności wynosi 1. Wobec powyższego prawdziwe jest również:

$$N + R = 1, \text{ a stąd} \quad (4.17)$$

$$R = 1 - N \quad (4.18)$$

Analiza i ocena ryzyka pozwoli więc na określenie niezawodności funkcjonowania systemu i odwrotnie. Podejście niezawodnościowe w analizie i ocenie ryzyka, pomimo że daje więcej możliwości, to nie lokalizuje czynników ryzyka w systemie. Dlatego konieczne jest opracowanie odpowiedniej metodyki.

4.7 Struktura niezawodnościowa systemów

Na zawodność (ryzyko) lub na niezawodność systemu wpływa również jego struktura. Ponieważ rozpatrywany system może być układem prostym lub złożonym, na jego niezawodność wpływ będzie miała struktura niezawodnościowa, określająca związek stanu niezawodności systemu ze stanem niezawodności jego obiektów [11].

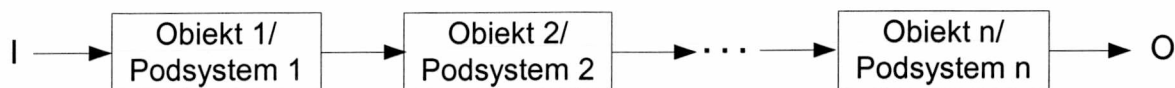
W zależności od sprzężeń występujących pomiędzy obiektami w systemach, w tym również produkcyjnych, można wyróżnić różne rodzaje struktur tych systemów. Rodzaj sprzężenia poszczególnych obiektów w systemie przekłada się na sposób jego funkcjonowania, sterowania i regulacji. Analiza struktury niezawodnościowej systemu powinna być poprzedzona podziałem systemu na poszczególne części składowe – dekompozycją systemu (porównaj rozdział 3.3), odzwierciedlającą powiązania logiczne w systemie tak, aby poszczególne jego części były niezależne statystycznie i możliwie jak największe [85]. W zależności od rodzaju sprzężenia pomiędzy obiektami w systemie najczęściej spotykanymi strukturami niezawodnościowymi są struktury [11, 13, 56, 85, 106]:

- szeregowo,
- równoległe i
- szeregowo-równoległe.

4.7.1. Struktura szeregowo

System ma **strukturę szeregową**, jeśli do jego działania wymagane jest działanie wszystkich obiektów/ podsystemów. Oznacza to, że system funkcjonuje poprawnie, jeśli wszystkie jego składowe również funkcjonują poprawnie, natomiast z chwilą uszkodzenia któregośkolwiek obiektu/ podsystemu uszkodzeniu ulega cały system [75]. W strukturze

szeregową sprzężenie dwóch obiektów/ podsystemów polega na przekształceniu wektora wyjścia jednego obiektu/ podsystemu na wektor wejścia drugiego obiektu / podsystemu, jednak nie jest konieczne, aby wszystkie składowe wektora wyjściowego jednego systemu stały się składowymi wektora wejściowego drugiego systemu. Przykładową strukturę szeregową systemu o n obiektach/ podsystemach przedstawiono na rysunku 34, na którym „I” oznacza wejście do systemu, a „O” wyjście z systemu.



Rys. 34. Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi szeregowo

Przy tego typu układach niezawodność systemu jest iloczynem niezawodności jego obiektów, stąd wraz ze wzrostem liczby obiektów w systemie jego niezawodność maleje. Niezawodność systemu (N_S) o strukturze szeregowej będzie określana wzorem [75]:

$$N_S = N_1 N_2 \dots N_n, \quad (4.19)$$

gdzie N_1, N_2, N_n - niezawodność poszczególnych obiektów/ podsystemów systemu.

Korzystając ze wzorów (4.18) i (4.19) ryzyko całkowite (R_c) tego systemu będzie wynosić:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)], \quad (4.20)$$

gdzie R_1, R_2, R_n - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Struktura szeregową jest najczęstszym rodzajem struktury w systemach i procesach produkcyjnych [67]. Przykładowo, uszkodzenie jednej maszyny w procesie wytwórczym powoduje nieprawidłowe funkcjonowanie lub brak funkcjonowania całego systemu produkcyjnego. Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego na poziomie KP^0 przedstawia rysunek 35.



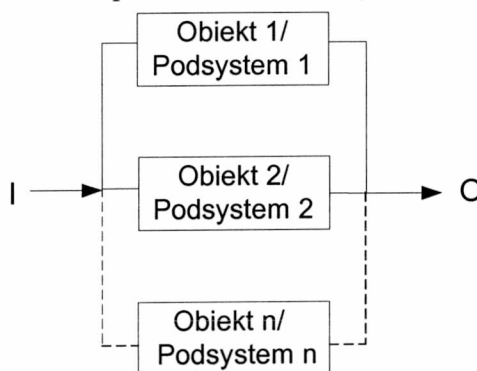
Rys. 35. Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego: P – piła, T – tokarka, F – frezarka, S – szlifierka

Wzory na niezawodność i ryzyko dla tego systemu produkcyjnego będą zgodnie ze wzorami (4.19) i (4.20) przedstawiać się następująco:

- niezawodność całkowita: $N = N_P N_T N_F N_S N_T$,
- ryzyko całkowite: $R_c = 1 - [(1 - R_P)(1 - R_T)(1 - R_F)(1 - R_S)(1 - R_T)]$.

4.7.2. Struktura równoległa z nadmiarami

Według teorii klasycznej, niezawodność charakteryzuje się tym, że system jest w stanie zdatności, jeżeli co najmniej jeden z jego obiektów jest w stanie zdatności [11], co oznacza, że do poprawnego funkcjonowania systemu wystarcza poprawne funkcjonowanie jednego jego elementu. Niezawodność takiego układu wzrasta przy zwiększaniu liczby obiektów równolegle sprzężonych. Przykładowy, schemat niezawodnościowej struktury równoległej systemu o n obiektach przedstawiono na rysunku 36.



Rys. 36. Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi równolegle

Niezawodność systemu (N_S) przedstawionego na rysunku 36 będzie określana wzorem [79]:

$$N_S = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2)...(1 - N_n)], \quad (4.21)$$

gdzie N_1, N_2, N_n - niezawodność poszczególnych obiektów/ podsystemów systemu.

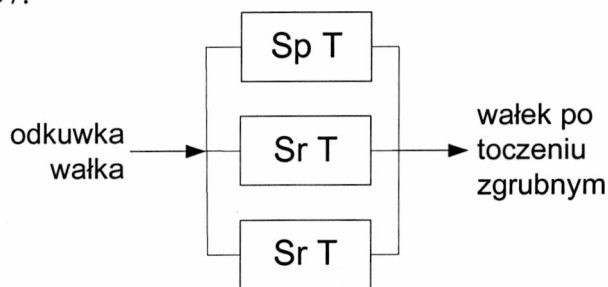
Ryzyko całkowite R_c systemu można wyznaczyć na podstawie wzorów (4.18) i (4.21):

$$R_c = R_1 R_2 ... R_n = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (4.22)$$

gdzie R_1, R_2, R_n - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

W praktyce produkcyjnej występują struktury równoległe, jednak charakter procesu produkcyjnego nie pozwala na taką interpretację struktury niezawodnościowej. Klasyczna teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1 urządzeń technicznych. Oznacza to, że w interpretacji klasycznej teorii niezawodności system produkcyjny byłby uznany za niezawodny, jeśli choćby jeden element funkcjonowałby poprawnie. W systemach produkcyjnych taka sytuacja występuje jedynie w tzw. systemach z rezerwą [7, 67, 75], czyli z nadmiarem elementów funkcjonujących w systemie. W rzeczywistości systemy z rezerwą występuje bardzo rzadko, gdyż nadmiar elementów (np. maszyn, pracowników, środków transportu, itd.) oznacza niewykorzystane zasoby, co pociąga za sobą wzrost

kosztów. Przykład produkcyjnej struktury równoległej z nadmiarami na poziomie KP^0 przedstawia rysunek 37.



Rys. 37. Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej z nadmiarami systemu produkcyjnego: Sp T – stanowisko pracujące tokarka, Sr T – stanowisko rezerwowe tokarka.

Wzory na niezawodność i ryzyko systemu produkcyjnego z rysunku 37 będą zgodnie ze wzorami (4.21) i (4.22) przedstawiać się następująco:

- niezawodność całkowita: $N_S = 1 - [(1 - N_{SpT})(1 - N_{SrT})(1 - N_{SrT})]$,
- ryzyko całkowite: $R_c = R_{SpT}R_{SrT}R_{SrT}$.

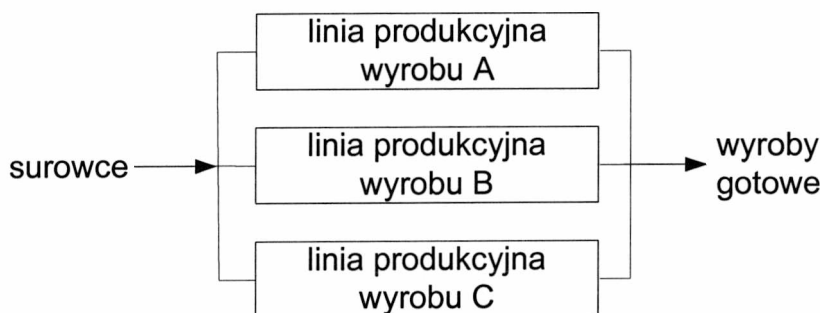
4.7.3. Produkcyjna struktura równoległa

Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, systemy produkcyjne z rezerwą w praktyce produkcyjnej występują niezmiernie rzadko, to w niniejszej pracy proponuje się inny sposób interpretacji i określania ryzyka dla **produkcyjnych struktur równoległych**. Dla struktury n -elementowej, przedstawionej na rysunku 36, ryzyko zawodności jednego elementu R_i powinno zwiększyć ryzyko całkowite R_c układu o wartość R_i . Zatem ryzyko całkowite powinno być sumą ryzyk poszczególnych elementów układu

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (4.23)$$

gdzie R_1, R_2, R_n - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Przykładem produkcyjnej struktury równoległej poziomu KP^1 może być struktura systemu produkcyjnego przedstawiona na rysunku 38.



Rys. 38. Przykład produkcyjnej struktury równoległej

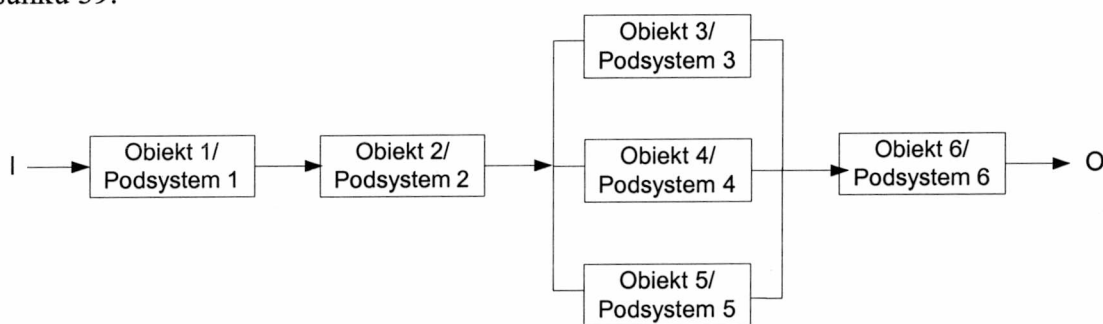
Wzór na ryzyko dla systemu z rysunku 38, zgodnie ze wzorem (4.23) będzie następujący:

$$R_c = R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC} = \sum_I^3 R_{lpwi},$$

gdzie $lpwA$, $lpwB$, $lpwC$ - poszczególne linie produkcyjne wyrobu.

4.7.4. Struktura szeregowo-równoległa z nadmiarami

Stanowi mieszaninę struktury szeregowej i równoległej. Przykładowy schemat systemu o tej strukturze z 6-cioma obiektami/ podsystemami został przedstawiony na rysunku 39.



Rys. 39. Przykładowy schemat układu szeregowo-równoległego

Do obliczania niezawodności (N_s) systemu o tego typu strukturze wykorzystuje się wcześniej przedstawione wzory (4.19) i (4.21). Stąd niezawodność układu z rysunku 39 będzie określana wzorem:

$$N_s = N_1 N_2 [1 - (1 - N_3)(1 - N_4)(1 - N_5)] N_6 \quad (4.24)$$

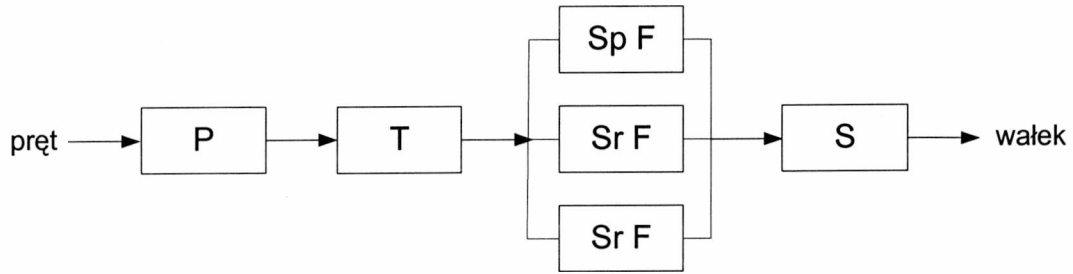
$N_1, N_2, \dots, N_6$ - niezawodność poszczególnych obiektów/ podsystemów systemu.

Zawodność (ryzyko) wg interpretacji klasycznej teorii niezawodności lub w układach szeregowo – równoległych z nadmiarami przedstawiać się będzie następująco:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3 R_4 R_5)(1 - R_6)] \quad (4.25)$$

$R_1, R_2, \dots, R_6$ - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Produkcyjny przykład struktury szeregowo - równoległej z nadmiarami przedstawia rysunek 40.



Rys. 40. Przykład struktury systemu produkcyjnego szeregowo - równoległej z nadmiarami: P – piła, T – tokarka, Sp F – stanowisko pracujące frezarka, Sr F – stanowisko rezerwowe frezarka, S - szlifierka

Niezawodność całkowita i ryzyko dla systemu produkcyjnego z rysunku 40, zgodnie ze wzorami (4.24) i (4.25), będzie wynosić:

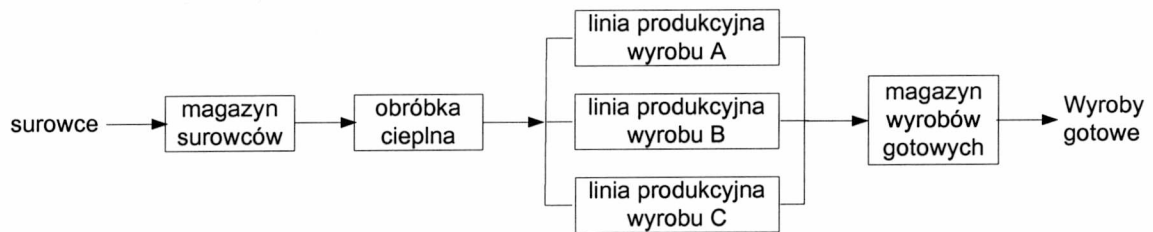
- niezawodność systemu $N = N_P N_T [1 - (1 - N_{SpF})(1 - N_{SrF})(1 - N_{SrF})] N_S$
- ryzyko całkowite $R_c = 1 - [(1 - R_P)(1 - R_T)(1 - R_{SpF} R_{SrF} R_{SrF})(1 - R_S)]$

4.7.5. Produkcyjna struktura szeregowo - równoległa

Traktując jednak układ z rysunku 39 jako **produkcyjną strukturę szeregowo - równoległą**, przy tych samych oznaczeniach i na podstawie wzoru (4.23), wzór (4.25) przyjmie postać:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - (R_3 + R_4 + R_5))(1 - R_6)] \quad (4.26)$$

Przykład produkcyjnej struktury równoległej poziomu KP^1 przedstawia rysunek 41.



Rys. 41. Przykład produkcyjnej struktury szeregowo - równoległej

Wzór (4.26) na ryzyko całkowite dla tego układu będzie się przedstawiać następująco:

$$R_c = 1 - [(1 - R_{ms})(1 - R_{oc})(1 - (R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC}))(1 - R_{mwig})],$$

gdzie:

ms – magazyn wyrobów gotowych,

oc – obróbka cieplna,

$lpwA$, $lpwB$, $lpwC$ – linie produkcyjne wyrobów A, B i C,

$mwig$ – magazyn wyrobów gotowych.

Przeniesienie teorii niezawodności na grunt systemów produkcyjnych daje nowe możliwości w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Potraktowanie systemu produkcyjnego jako systemu w ujęciu teorii systemów oraz jego dekompozycja na podsystemy umożliwia zbudowanie struktur niezawodnościowych. Rodzaj struktury zależy będzie od celu stawianego analizie, dekompozycji oraz logiki przepływu procesu produkcyjnego.

Jedynym mankamentem tego podejścia jest rzadkie występowanie w rzeczywistości produkcyjnej struktur równoległych z nadmiarami. Znacznie częściej spotyka się struktury nazwane i scharakteryzowane w tej pracy przez autora jako produkcyjne struktury równoległe. Ponieważ również dla tego typu systemów istnieje możliwość zbudowania struktury niezawodnościowej oraz wyznaczenie ryzyka, to podejście to będzie kontynuowane i rozwijane w dalszej części pracy.

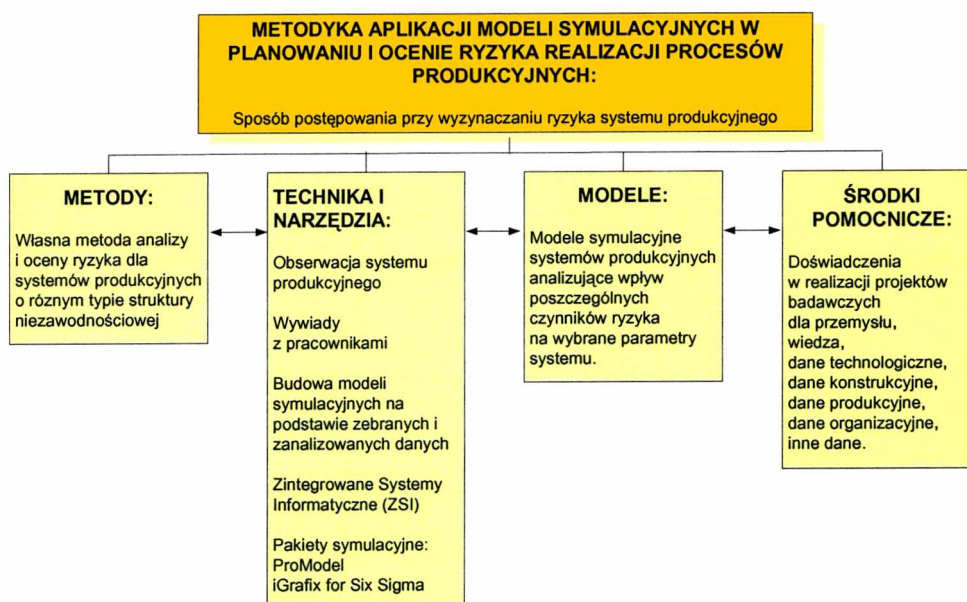
Rozdział 5. Metodyka planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

Przedstawiono etapowy sposób postępowania w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych. Zaprezentowano własną metodę wyznaczania wielkości i struktury ryzyka w oparciu o rodzaj struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego oraz strat spowodowanych występowaniem czynników ryzyka w poszczególnych obszarach dowolnie dekomponowanego systemu. Zaproponowano konstrukcję współczynników wagowych, uniezależniających poziom ryzyka od poziomu organizacji systemu produkcyjnego. Etapy metodyki zilustrowano prostym przykładem wyznaczenia ryzyka dla procesu produkcyjnego korpusu belki bujakaowej.

Metodyka to termin, który dotyczy wielu obszarów i dziedzin. Najbardziej uniwersalna definicja metodyki brzmi „zbiór zasad dotyczących sposobów wykonania jakiejś pracy lub tryb postępowania prowadzący do określonego celu” [55]. Elementy składowe metodyki to:

- metody,
- technika i narzędzia,
- modele,
- środki pomocnicze.

Rysunek 42 przedstawia elementy składowe metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych zaprezentowanej w pracy.



Rys. 42. Elementy składowe metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

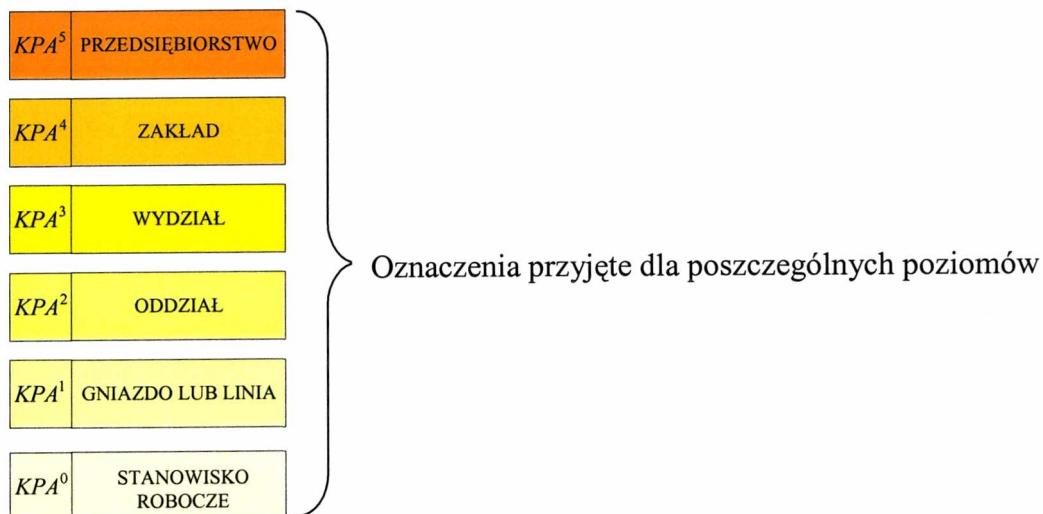
Proponowana metodyka powinna umożliwiać oszacowanie wielkości ryzyka dla dowolnie zdekomponowanego systemu produkcyjnego. Spowoduje to, że jej charakter będzie uniwersalny oraz że będzie można dostosować ją do potrzeb przeprowadzanej analizy, a nie, jak w przypadku metod opisanych w rozdziale 1, do potrzeb metod. Dodatkowymi cechami, którymi powinna się charakteryzować powinna być możliwość wyznaczenia obszaru o największym poziomie ryzyka oraz możliwość wyznaczenia wielkości strat na analizowanym wskaźniku spowodowanych występowaniem czynników ryzyka. Ponadto dzięki zaproponowanym współczynnikom wagowym można wyznaczyć rzeczywisty poziom ryzyka w poszczególnych obszarach systemu, eliminując w ten sposób wpływ na wyniki poziomu organizacyjnego w systemie produkcyjnym.

5.1 Etapy postępowania w metodyce

Poniżej przedstawione zostały etapy postępowania w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesu (systemu) produkcyjnego. Etapy te wynikają z analizy literatury przedstawionej w rozdziale trzecim i czwartym oraz z doświadczenia praktycznego zdobytego podczas realizacji projektów badawczych w przemyśle.

ETAP 1. Ustalenie poziomu analizy

Poziom analizy powinien określać stopień szczegółowości, na którym analizowany będzie system produkcyjny. Proponuje się przyjęcie następujących poziomów odpowiadających strukturze produkcyjnej:



Decyzja o poziomie, na którym prowadzone będzie planowanie i ocena ryzyka procesu produkcyjnego, powinna zależeć od celu prowadzonej analizy.

ETAP 2. Zdefiniowanie celu

Cel systemu produkcyjnego powinien być wyrażony liczbowo lub poprzez wskaźnik charakteryzujący system produkcyjny. Wartość teoretyczna wskaźnika powinna wynikać z możliwości technologicznych systemu produkcyjnego, przy założeniu jego pełnej niezawodności i wydajności.

W_{teoret} - przyjęte oznaczenie liczby lub wskaźnika teoretycznie możliwego do uzyskania przez system produkcyjny.

Ponieważ większość definicji literaturowych niezawodności obiektu odnosi się do „przedziału czasu” lub do określonej chwili w czasie, to proponuje się również wybranie takiego wskaźnika, który odnosi się do zadanego przedziału czasu. Wskaźnikami takimi są między innymi:

- wydajność,
- produktywność,
- zdolność produkcyjna.

Dodatkowo, za słusznością analizy tych właśnie wskaźników przemawia to, że dwa pierwsze z nich są najczęściej zalecanymi przez literaturę dotyczącą analizy systemów produkcyjnych (porównaj rozdział 3, punkt 3.4.1 i rozdział 4, punkt 4.6).

ETAP 3. Dekompozycja

Dekompozycja systemu produkcyjnego może zostać przeprowadzona według dowolnie przyjętych klasyfikatorów lub na dowolnie wybrane elementy składowe. Liczba obszarów lub elementów systemu produkcyjnego powinna zależeć od celu prowadzonej analizy. Obszary i elementy mogą być zarówno abstrakcyjne, jak i rzeczywiste.

$O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ - przyjęte oznaczenie dla wybranych do analizy obszarów, komponentów lub elementów systemu produkcyjnego, nazywanych dalej obszarami.

Przy dekompozycji systemu na obszary należy przyjąć następujące założenia:

- obszary nie mogą na siebie zachodzić,
- proces przebiega przez wszystkie wyróżnione obszary lub wyróżnione obszary wpływają na poszczególne fazy jego przebiegu,
- obszary muszą obejmować cały system produkcyjny.

ETAP 4. Wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu

Wyznaczone w Etapie 3 obszary powinny posłużyć do wyznaczenia struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego. W przypadku wystąpienia struktury

równoległej o obszarach różniących się między sobą, konieczne jest wyznaczenie wartości W_{teoret} dla każdego z obszaru. W przypadku struktury równoległej o takich samych obszarach konieczność taka nie występuje.

ETAP 5. Wyodrębnienie czynników ryzyka w poszczególnych obszarach

Przy wyodrębnianiu czynników ryzyka można posłużyć się takimi technikami jak: obserwacja przebiegu procesu w poszczególnych obszarach, analiza dokumentacji, wywiady z osobami z różnych szczebli organizacyjnych zaangażowanymi w proces produkcyjny w analizowanym obszarze.

Za **czynniki ryzyka** przyjmuje się *czynniki, które pojawiają się w systemie w sposób losowy i nie ma możliwości prostej ich eliminacji poprzez zmiany organizacyjne*. W celu prawidłowego wyodrębnienia czynników ryzyka należy Etap 4 podzielić na dwie fazy:

- 1) wyodrębnienie wszystkich czynników wywołujących zakłócenia w systemie produkcyjnym i wpływających na osiągnięcie założonego celu,
- 2) analizę tych czynników i eliminację **czynników organizacyjnych**, czyli *czynników powodujących zakłócenia w systemie produkcyjnym, lecz dających się wyeliminować poprzez proste zmiany organizacyjne*.

r_i - przyjęte oznaczenie dla czynnika ryzyka,

or_i - przyjęte oznaczenie dla czynnika organizacyjnego.

ETAP 6. Pomiar czynników ryzyka i wyznaczenie reprezentatywnego okresu analizy

Etap ten polega na obserwacji i przeprowadzeniu szczegółowych pomiarów czasów przebiegu procesu produkcyjnego w poszczególnych obszarach oraz na analizie dokumentacji produkcyjnej. Ma to na celu oszacowanie częstotliwości i wielkości wyróżnionych czynników ryzyka oraz określenie ich podstawowych charakterystyk.

Oprócz szczegółowych danych na temat czynników ryzyka etap ten powinien również dostarczyć informacji na temat okresu $[T]$, którego powinna dotyczyć przeprowadzana analiza. Okres ten powinien być reprezentatywny dla losowo pojawiających się czynników ryzyka w systemie. W zależności od specyfiki procesu produkcyjnego oraz częstotliwości pojawiania się czynników ryzyka okres ten może obejmować od tygodnia do roku.

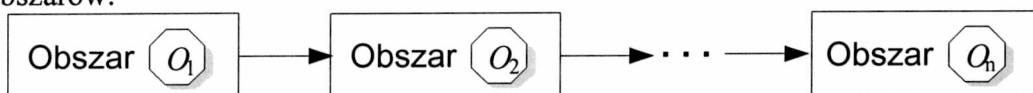
ETAP 7. Budowa modeli systemu produkcyjnego

W związku z szybkością obliczeń na komputerze, łatwością wprowadzania ewentualnych zmian oraz możliwością prowadzenia analizy wariantowej w pracy proponuje się budowę modeli symulacyjnych z wykorzystaniem pakietów symulacyjnych. Istnieje również możliwość budowy innych modeli, np. matematycznych i analitycznych.

Budowane modele powinny dostarczyć danych na temat wpływu czynników ryzyka na wartość W_{teoret} w poszczególnych obszarach systemu produkcyjnego.

ETAP 8. Oszacowanie poziomu ryzyka dla wybranych struktur niezawodnościowych systemu produkcyjnego**8a) Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej**

Rysunek 43 przedstawia przykład struktury niezawodnościowej szeregowej dla n obszarów.



Rys. 43. Przykład struktury szeregowej systemu o n obszarach

Zgodnie ze wzorem (4.20), ryzyko całkowite R_c systemu o strukturze szeregowej może być wyznaczone ze wzoru:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)] \quad (5.1)$$

Dla poszczególnych obszarów wielkości ryzyka R_i oblicza się w następujący sposób:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (5.2)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} \quad (5.3)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret} - S_1 - \dots - S_{n-1}}, \quad (5.4)$$

gdzie S_i - oznacza stratę w i -tym obszarze spowodowaną występowaniem w tym obszarze czynników ryzyka r_i .

Straty S_i w poszczególnych obszarach zależą są od strat czasów spowodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego z uwagi na występujące w tych obszarach czynniki ryzyka. Inaczej mówiąc, system produkcyjny zrealizuje postawiony cel, lecz będzie potrzebował na jego realizację więcej czasu. Wówczas straty na celu mierzalnym systemu produkcyjnego, spowodowane czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, będą przedstawiać się następująco:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (5.5)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (5.6)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T}, \quad (5.7)$$

gdzie:

Δt_i - straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka.

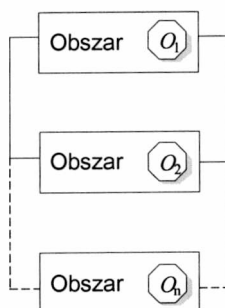
T – oznacza jednostkę czasu lub okres, dla którego wyznaczono osiągnięcie celu przez system produkcyjny i jest okresem reprezentatywnym wyznaczonym w Etapie 6 metodyki.

Zatem **ryzyko całkowite** R_c dla systemu o n obszarach i strukturze szeregowej będzie wynosić:

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_{n-1}})] \quad (5.8)$$

8b) Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze równoległej z nadmiarami

Rysunek 44 przedstawia przykład struktury niezawodnościowej równoległej dla n obszarów.



Rys. 44. Przykład struktury niezawodnościowej systemu o n obszarach

Zgodnie ze wzorem (4.22), ryzyko całkowite R_c systemu o takiej strukturze może być wyznaczone ze wzoru:

$$R_c = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (5.9)$$

Przyjmując te same oznaczenia co w metodzie z punktu 8a, poszczególne ryzyka R_i dla systemu o strukturze równoległej z nadmiarami i n obszarach będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (5.10)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (5.11)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}}, \quad (5.12)$$

Uzależniając straty w poszczególnych obszarach od strat czasów, tak jak w punkcie 8a, otrzymujemy:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (5.13)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (5.14)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (5.15)$$

Zatem **ryzyko całkowite** R_c dla systemu o n obszarach i strukturze równoległej z nadmiarami będzie wynosić:

$$R_c = \frac{\Delta t_1}{T} \frac{\Delta t_2}{T} \dots \frac{\Delta t_n}{T} \quad (5.16)$$

Ponieważ jednak struktury równoległe z nadmiarami w praktyce produkcyjnej występują bardzo rzadko (porównaj rozdział 4, punkt 4.7), dlatego w punkcie 8c zaproponowano metodę wyznaczania ryzyka dla systemu o produkcyjnej strukturze równoległej.

8c) Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o produkcyjnej strukturze równoległej

Traktując strukturę systemu z rysunku 44 jako produkcyjną strukturę równoległą oraz korzystając z wzoru (4.23), dla tych samych oznaczeń, ryzyko systemu może być obliczone według wzoru:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (5.17)$$

Przyjmując te same oznaczenia, co wcześniej, poszczególne ryzyka R_i dla n obszarów, w zależności od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (5.18)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (5.19)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (5.20)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary różnią się między sobą, istnieje konieczność, przy tego typu strukturze, wyznaczenia wartości W_{teoret} dla każdego z obszarów. Wyznaczając wartości W_{teoret} dla każdego z wyróżnionych n obszarów, poszczególne straty S_i w tych obszarach, zależnie od strat czasów powodowanych występowaniem czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, będą wynosić:

$$S_1 = W_{teoret}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (5.21)$$

$$S_2 = W_{teoret}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (5.22)$$

$$S_n = W_{teoret}^n \frac{\Delta t_n}{T}, \quad (5.23)$$

gdzie:

W_{teoret}^i - oznacza wartość teoretyczną wskaźnika w poszczególnych obszarach zdekomponowanego systemu,

Δt_i - straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka.

Zatem **ryzyko całkowite** R_c dla systemu o n obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej będzie wynosić:

$$R_c = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n}{W_{teoret} T} \quad (5.24)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary systemu są takie same i charakteryzują się tą samą wartością W_{teoret}^i , czyli:

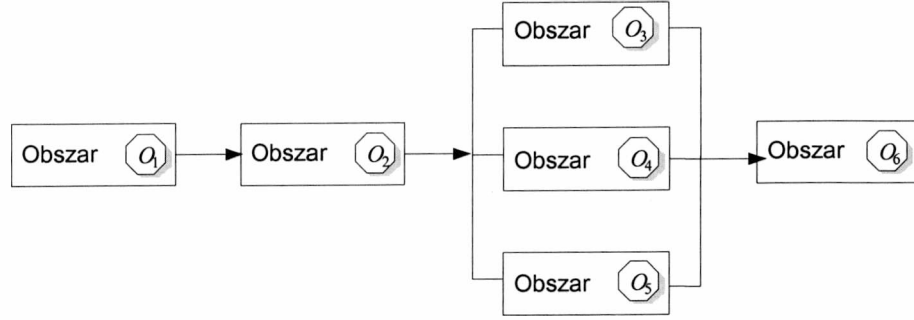
$$W_{teoret}^1 = W_{teoret}^2 = \dots = W_{teoret}^n = \frac{W_{teoret}}{n} \quad (5.25)$$

wówczas wzór na ryzyko całkowite takiego układu przyjmie postać:

$$R_c = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (5.26)$$

8d) Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze szeregowo-równoległej z nadmiarami

Rysunek 45 przedstawia przykład struktury niezawodnościowej szeregowo-równoległej z nadmiarami dla 6 obszarów.



Rys. 45. Przykład struktury niezawodnościowej systemu o 6 obszarach

Zgodnie ze wzorem (4.25) ryzyko całkowite R_c systemu o takiej strukturze może być wyznaczone ze wzoru:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3 R_4 R_5)(1 - R_6)] \quad (5.27)$$

Przyjmując te same oznaczenia co wcześniej, poszczególne ryzyka R_i dla 6-ciu obszarów systemu przedstawionego na rysunku 45, zależnie od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (5.28)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} \quad (5.29)$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.30)$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.31)$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.32)$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} \quad (5.33)$$

Uzależniając straty w poszczególnych obszarach od strat czasów spowodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego, otrzymujemy że:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (5.34)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (5.35)$$

$$S_3 = W_{teoret} \frac{\Delta t_3}{T} \quad (5.36)$$

$$S_4 = W_{teoret} \frac{\Delta t_4}{T} \quad (5.37)$$

$$S_5 = W_{teoret} \frac{\Delta t_5}{T} \quad (5.38)$$

$$S_6 = W_{teoret} \frac{\Delta t_6}{T} \quad (5.39)$$

Zatem **ryzyko całkowite** R_c dla systemu o 6-ciu obszarach i strukturze szeregowo – równoległej z nadmiarami będzie wynosić:

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T}\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}\right) \left(1 - \frac{\Delta t_3 \Delta t_4 \Delta t_5}{T - \Delta t_1 - \Delta t_2}\right) \left(1 - \frac{\Delta t_6}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_5}\right) \right] \quad (5.40)$$

8e) Metoda wyznaczania wielkości ryzyka systemów o produkcyjnej strukturze szeregowo-równoległej

Traktując strukturę z rysunku 44 jako produkcyjną strukturę szeregowo-równoległą przy obliczaniu ryzyka całkowitego należy skorzystać ze wzoru (4.26):

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - (R_3 + R_4 + R_5))(1 - R_6)] \quad (5.41)$$

Przy tych samych oznaczeniach poszczególne ryzyka R_i dla 6-ciu obszarów takiego systemu, zależnie od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (5.42)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} \quad (5.43)$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.44)$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.45)$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2} \quad (5.46)$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} \quad (5.47)$$

Ponieważ obszary O_3, O_4, O_5 tworzą produkcyjną strukturę równoległą, to istnieje konieczność wyznaczenia wartości W_{teoret} dla każdego z obszarów. Wyznaczając wartości $W_{teoret}^3, W_{teoret}^4, W_{teoret}^5$ dla każdego z tych obszarów, poszczególne straty S_i uzależnione od strat czasów powodowanych występowaniem czynnika ryzyka, będą wynosić:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (5.48)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (5.49)$$

$$S_3 = W_{teoret}^3 \frac{\Delta t_3}{T} \quad (5.50)$$

$$S_4 = W_{teoret}^4 \frac{\Delta t_4}{T} \quad (5.51)$$

$$S_5 = W_{teoret}^5 \frac{\Delta t_5}{T} \quad (5.52)$$

$$S_6 = W_{teoret} \frac{\Delta t_6}{T} \quad (5.53)$$

Zatem **ryzyko całkowite** R_c dla systemu o 6-ciu obszarach i produkcyjnej strukturze szeregowo – równoległej będzie wynosić:

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T}\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}\right) \left(1 - \frac{W_{teoret}^3 \Delta t_3 + W_{teoret}^4 \Delta t_4 + W_{teoret}^5 \Delta t_5}{W_{teoret} (T - \Delta t_1 - \Delta t_2)}\right) \right. \\ \left. \left(\frac{W_{teoret} \Delta t_6}{W_{teoret} (T - \Delta t_1 - \Delta t_2) - W_{teoret}^3 \Delta t_3 - W_{teoret}^4 \Delta t_4 - W_{teoret}^5 \Delta t_5} \right) \right] \quad (5.54)$$

ETAP 9. Uwzględnienie wag w metodzie

Opisana w punktach 8a, 8b, 8c, 8d i 8e metoda oceny ryzyka dla różnych typów struktur systemów produkcyjnych może posłużyć do określenia wielkości ryzyka w poszczególnych obszarach i w całym systemie produkcyjnym. Czasami jednak organizacja procesu produkcyjnego może powodować, że wyznaczona wielkość ryzyka nie jest adekwatna do rzeczywistych wielkości zakłóceń w systemie produkcyjnym. Przykładem mogą być np. opóźnienia w dostawach elementów stanowiące czynnik ryzyka, niwelowane jednak przez zapasy magazynowe. Wówczas rzeczywisty wpływ opóźnień na system produkcyjny jest mniejszy, niż wynika to z zarejestrowanych czasów dostaw. Dlatego proponuje się zastosowanie w metodzie współczynników wagowych, których konstrukcja umożliwia określenie rzeczywistego poziomu ryzyka w systemie.

Przy pomocy współczynników wagowych można również wyznaczyć, jak wprowadzona do systemu produkcyjnego zmiana organizacyjna wpłynie na obniżenie poziomu ryzyka systemu. Można na przykład oszacować, przy jakim poziomie zapasu bezpieczeństwa poziom ryzyka zmniejszy się do poziomu zadowalającego.

Proponuje się następującą konstrukcję współczynnika wagowego:

$$w_i = \frac{\Delta t_i^r}{\Delta t_i}, \quad (5.55)$$

gdzie:

Δt_i^r - rzeczywisty czas wydłużenia produkcji spowodowany wystąpieniem i-tego czynnika ryzyka,

Δt_i - straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka.

Taka konstrukcja wag pomniejsza wartość ryzyka dla obszarów, w których organizacja procesu produkcyjnego niweluje wpływ rzeczywistego poziomu zakłóceń. Wówczas przedstawione powyżej wzory na ryzyko całkowite R_c dla różnych typów struktur niezawodnościowych będą przedstawiać się następująco:

- dla systemu o n obszarach i strukturze szeregowej

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2\right) \dots \left(1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 w_1 - \dots - \Delta t_{n-1} w_{n-1}} w_n\right) \right] \quad (5.56)$$

- dla systemu o n obszarach i strukturze równoległej z nadmiarami

$$R_c = \frac{\Delta t_1}{T} w_1 \frac{\Delta t_2}{T} w_2 \dots \frac{\Delta t_n}{T} w_n \quad (5.57)$$

- dla systemu o n obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej

$$R_c = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 w_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 w_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n w_n}{W_{teoret} T} \quad (5.58)$$

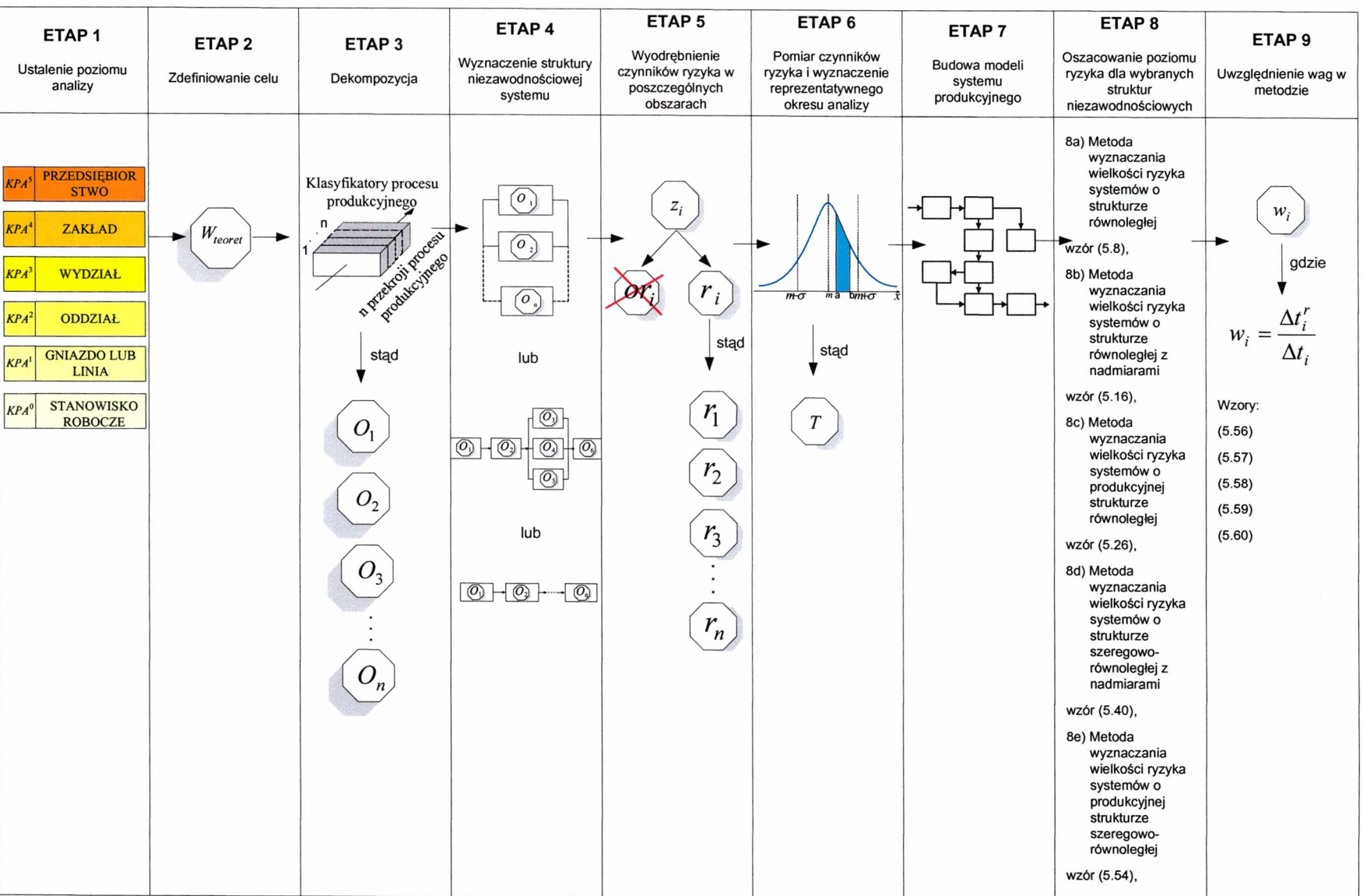
- dla systemu o 6-ciu obszarach i strukturze szeregowo – równoległej z nadmiarami

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2\right) \left(1 - \frac{\Delta t_3 \Delta t_4 \Delta t_5}{T - \Delta t_1 w_1 - \Delta t_2 w_2} w_3 w_4 w_5\right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{\Delta t_6}{T - \Delta t_1 w_1 - \dots - \Delta t_5 w_5} w_6\right) \right] \quad (5.59)$$

- dla systemu o 6-ciu obszarach i produkcyjnej strukturze szeregowo – równoległej

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2\right) \left(1 - \frac{W_{teoret}^3 \Delta t_3 w_3 + W_{teoret}^4 \Delta t_4 w_4 + W_{teoret}^5 \Delta t_5 w_5}{W_{teoret} (T - \Delta t_1 w_1 - \Delta t_2 w_2)} \right) \right. \\ \left. \left(\frac{W_{teoret} \Delta t_6}{W_{teoret} (T - \Delta t_1 w_1 - \Delta t_2 w_2) - W_{teoret}^3 \Delta t_3 w_3 - W_{teoret}^4 \Delta t_4 w_4 - W_{teoret}^5 \Delta t_5 w_5} w_6 \right) \right] \quad (5.60)$$

Rysunek 46 przedstawia poszczególne etapy metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych.



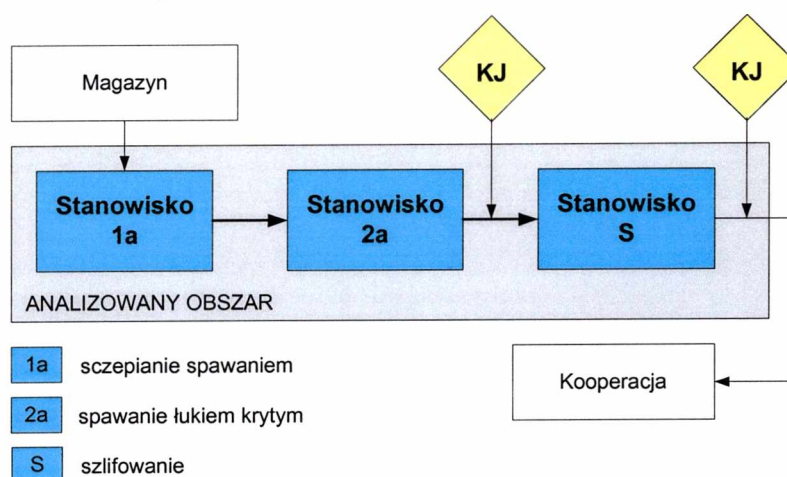
Rys. 46. Etapy postępowania w metodycie aplikacji modeli symulacyjnych planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

5.2 Przykład zastosowania metodyki

W celu zaprezentowania praktycznych możliwości zastosowania opracowanej metodyki do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych, poniżej zostanie przeprowadzona ocena ryzyka procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej. Korpus belki bujakowej wchodzi w skład struktury produktu ramy wózka MD 523, dla której, w dalszej części pracy (porównaj rozdział 7), zostanie przeprowadzona weryfikacja praktyczna opracowanej metodyki. Szczegółowa struktura produktu i procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej, jak również ramy MD 523, została zamieszczona w ZAŁĄCZNIK 2.

5.2.1 Charakterystyka procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej

Produkcja korpusu belki bujakowej odbywa się na linii produkcyjnej ramy wózka MD 523 i została schematycznie przedstawiona na rysunku 47.



Rys. 47. Proces produkcyjny korpusu belki bujakowej

Proces produkcyjny rozpoczyna się od dostarczenia przez poddostawców elementów do magazynu. Elementy z magazynu trafiają na halę produkcyjną, a po zakończeniu procesu produkcji wywożone są do kooperacji na operacje toczenia i frezowania. Na proces produkcyjny składają się operacje szczepiania, spawania i szlifowania spoin. Na stanowiskach 2a i S, po zakończeniu operacji odbywa się kontrola jakości. W razie wykrycia nieprawidłowości element nie przechodzi na kolejne stanowisko tylko jest złomowany lub naprawiany na stanowisku na którym błąd został wykryty. Transport elementów odbywa się na zewnątrz hali produkcyjnej przy pomocy wózków, a poza nią za pomocą suwnic. Czasy transportu, załadunku oraz kontroli jakości na stanowiskach zostały wliczone do czasów technologicznych. Poszczególne operacje technologiczne i ich czasy, z podziałem na stanowiska, zamieszczono w tabeli 25.

Tabela 25. Czasy technologiczne operacji na stanowiskach

Nazwa stanowiska	numer operacji	czas technologiczny [min]
1a. Sczepianie do spawania	10	41
	20	30
2a. Spawanie łukiem krytym	30	210
S. Szlifowanie spoin	50	25
	60	33

5.2.2 Wyznaczenie ryzyka procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej za pomocą opracowanej metodyki

ETAP 1. Ustalenie poziomu analizy

Za poziom analizy przyjęto najniższy poziom struktury produkcyjnej KPA^0 , czyli poziom stanowiska roboczego. Analizą objęto jedynie obszar procesu odbywającego się na hali produkcyjnej, pomijając obszar dostaw, magazynu i kooperacji.

ETAP 2. Zdefiniowanie celu

Za cel procesu produkcyjnego przyjęto jego wydajność teoretyczną:

$$W_{teoret} = 650 \text{ sztuk/rok}$$

Wielkość ta ograniczona jest jedynie możliwościami technologicznymi linii produkcyjnej. Przy jej wyznaczaniu uwzględniono jedynie czasy technologiczne i transportu, pełną niezawodności systemu i dostępność zasobów produkcyjnych.

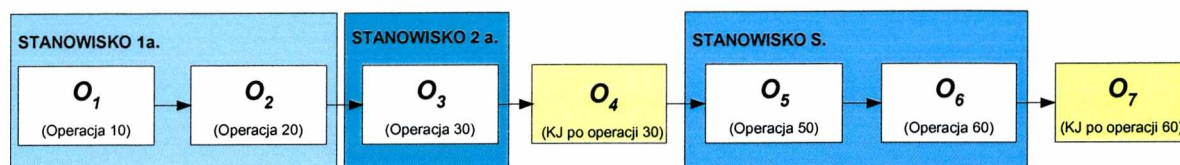
ETAP 3. Dekompozycja

Dekompozycji analizowanego procesu produkcyjnego korpusu dokonano na poszczególne operacje technologiczne i kontroli jakości, wyróżniając następujące obszary dla których zostanie wyznaczone ryzyko:

- O_1 - operacja 10,
- O_2 - operacja 20,
- O_3 - operacja 30,
- O_4 - kontrola jakości po operacji 30,
- O_5 - operacja 50,
- O_6 - operacja 60,
- O_7 - kontrola jakości po operacji 60.

ETAP 4. Wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu

Dla wyznaczonych w etapie poprzednim obszarów, biorąc pod uwagę specyfikę przebiegu procesu, ustalono że system będzie miał strukturę szeregową przedstawioną na rysunku 48.



Rys. 48. Szeregową strukturą analizowanego procesu

ETAP 5. Wyodrębnienie czynników ryzyka w poszczególnych obszarach

Na podstawie obserwacji bezpośrednich procesu produkcyjnego, analizy dokumentacji technologicznej oraz pomiarów czasów trwania poszczególnych operacji wyróżniono dwa czynniki ryzyka:

r_1 – dłuższy czas wykonywania operacji w stosunku do czasów z kart technologicznych,

r_2 – ryzyko napraw lub złomowania braków wykrytych podczas operacji kontroli jakości.

Ponieważ analizowany jest jedynie ograniczony fragment systemu produkcyjnego, a poszczególne obszary występują w ścisłej, zależności, czynnik r_1 będzie w dalszej części analizowany w obszarach O_1 , O_2 , O_3 , O_5 i O_6 , natomiast czynnik r_2 zostanie przypisany do obszarów O_4 , O_7 .

ETAP 6. Pomiar czynników ryzyka i wyznaczenie reprezentatywnego okresu analizy

W celu wyznaczenia wielkości, częstotliwości pojawiania się oraz charakterystyk wyróżnionych czynników ryzyka w okresie styczeń – marzec 2003 (12 tygodni), przeprowadzono bezpośrednią obserwację i pomiar czasów technologicznych procesu produkcyjnego. Ponieważ liczbę dokonanych w ten sposób pomiarów można uznać za próbę reprezentatywną, to również okres przyjęto za reprezentatywny.

$$T = 12 \text{ tygodni}$$

Dla tak wyznaczonego okresu wydajność teoretyczna (przyjęty cel systemu) będzie wynosić:

$$W_{teoret} = 168 \text{ sztuk/ } 12 \text{ tygodni}$$

Analiza czynnika ryzyka r_1 , czyli różnic czasów technologicznych i rzeczywistych wykonania operacji wykazała, że jest on spowodowany wadliwością przyrządów do składania (mocowania elementów) oraz złą jakością elementów

dostarczanych przez poddostawców. Różnicę czasów powoduje konieczność ustawiania przyrządów oraz naprawy elementów. Dla przeprowadzonych pomiarów czasu rzeczywistego wyznaczono wielkości średnie i przedstawiono je w tabeli 26.

Tabela 26. Zestawienie różnic pomiędzy czasami technologicznymi a rzeczywistymi

Stanowisko	Obszar	Nr operacji	Czas technologiczny [min]	Średni czas rzeczywisty [min]	Różnica czasów [min]
1a. Szczepianie do spawania	O_1	10	41	41	0
	O_2	20	30	30	0
2a. Spawanie łukiem krytym	O_3	30	210	480	270
Stanowisko S	O_5	50	25	25	0
	O_6	60	33	33	0

Z kolei, analiza procesu produkcyjnego pod kontem czynnika ryzyka r_2 wykazała, że 10% produkcji stanowią korpusy wadliwe. 7% z nich jest naprawiane na stanowisku na którym podczas kontroli jakości wykryto usterkę, natomiast 3% jest złomowanych. Złomowanie i naprawa wpływają negatywnie na postawiony cel systemu produkcyjnego, gdyż wydłużają czas produkcji. Czas naprawy nieprawidłowego elementu waha się od 10 min. do rzeczywistego czasu trwania operacji. Ponieważ czas ten nie jest stały, to w dalszej analizie przyjęto, że ma rozkład normalny. Tabela 27 zawiera zestawienie czasów korekt w procesie produkcji korpusów belki bujkowej.

Tabela 27. Zestawienie czasów korekt w procesie produkcji korpusów belki bujkowej

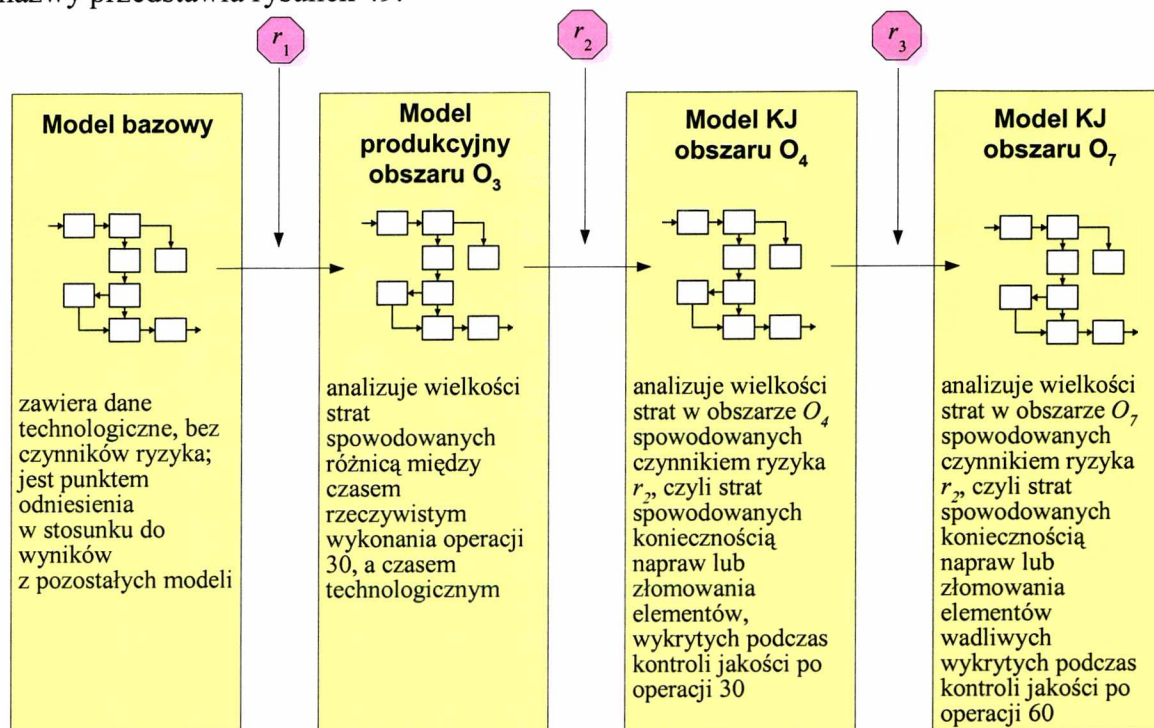
Nazwa obszaru	Oznaczenie obszaru	Czas rzeczywisty operacji poprzedzającej KJ [min.]	Średni czas korekty [min.]	Odchylenie standardowe [min.]
KJ po operacji 30	O_4	480	235	332,34
KJ po operacji 60	O_7	58	24	33,94

ETAP 7. Budowa modeli systemu produkcyjnego

W celu analizy i wyznaczenia wielkości strat w poszczególnych obszarach, spowodowanych występowaniem w nich czynników ryzyka, zdecydowano się na budowę modeli symulacyjnych i symulację wariantową. Do ich budowy wykorzystano pakiet symulacyjny iGrafx for Six Sigma.

Ponieważ analiza czynnika ryzyka r_1 wykazała, że różnica czasów rzeczywistych i technologicznych w obszarach O_1 , O_2 , O_5 i O_6 , (operacje 10, 20, 50 i 60) wynosi 0, to można stwierdzić, że w procesie produkcyjnym dla tych obszarów nie będą występować straty spowodowane tym czynnikiem ryzyka. W związku z tym nie ma konieczności budowania modeli symulacyjnych i wyznaczania wielkości strat dla tych obszarów.

W sumie zbudowano cztery modele symulacyjne. Sposób i cel ich budowy oraz nazwy przedstawia rysunek 49.



Rys. 49. Modele symulacyjne zbudowane w celu oceny ryzyka korpusu belki bujakowej

W tabeli 28 przedstawiono uzyskane w wyniku symulacji poszczególnych modeli dane na temat strat na współczynniku wydajności W_{teoret} oraz czasy potrzebne do wyprodukowania założonych 138 sztuk korpusów belki bujakowej.

Tabela 28. Wydajność i czas produkcji 138 sztuk korpusów

Model	Wydajność uzyskana w modelach dla 12 tygodni	Czas potrzebny na wyprodukowanie 138 sztuk korpusów [tyg.]
Bazowy	138	12,0
Produkcyjny obszar O_3	123	13,0
KJ obszaru O_4	116	14,5
KJ obszaru O_7	115	14,8

Przedstawione w tabeli 28 wyniki ilustruje rysunek 50.

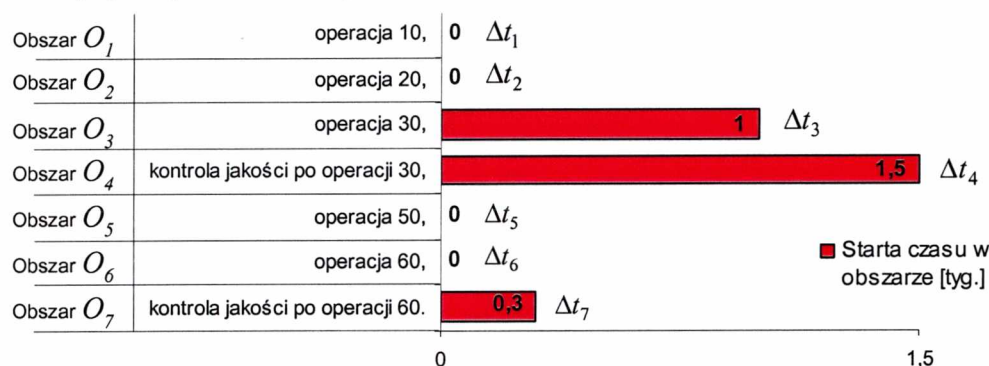


Rys. 50. Wyniki uzyskane z symulacji modeli

Wyniki symulacji pokazują, że wraz z wprowadzaniem kolejnych czynników ryzyka do modeli zmniejsza się wydajność oraz wydłuża się czas produkcji założonej liczby sztuk korpusów. Na tej podstawie można stwierdzić, że wzrasta prawdopodobieństwo nie osiągnięcia założonego celu systemu, czyli wyprodukowania 138 sztuk w analizowanym okresie $T = 12$ tygodni.

ETAP 8. Oszacowanie poziomu ryzyka dla wybranych struktur niezawodnościowych systemu produkcyjnego

Ponieważ jak ustalono w Etapie 4 metodyki, system produkcyjny korpusu belki bujawkowej ma strukturę szeregową, do wyznaczenia ryzyka całkowitego R_c zostanie zastosowana metoda analizy i oceny ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej. Dane, potrzebne do wyznaczenia wielkości strat w obszarach spowodowanych występowaniem czynników ryzyka, przedstawia rysunek 51.



Rys. 51. Straty czasu w poszczególnych obszarach procesu produkcji korpusu

Korzystając ze wzorów (5.5) do (5.7) metody analizy i oceny ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej można wyznaczyć wielkości strat na ustalonym w etapie 2 teoretycznym wskaźniku wydajności $W_{teoret} = 168$ sztuk/ 12 tygodni:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0$$

$$S_3 = W_{teoret} \frac{\Delta t_3}{T} = 168 \frac{1}{12} = 14 \text{ [szt./ 12 tygodni]}$$

$$S_4 = W_{teoret} \frac{\Delta t_4}{T} = 168 \frac{1,5}{12} = 21 \text{ [szt./ 12 tygodni]}$$

$$S_5 = W_{teoret} \frac{\Delta t_5}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0$$

$$S_6 = W_{teoret} \frac{\Delta t_6}{T} = 168 \frac{0}{12} = 0$$

$$S_7 = W_{teoret} \frac{\Delta t_7}{T} = 168 \frac{0,3}{12} = 4,2 \text{ [szt./ 12 tygodni]}$$

Znając wielkości strat można wyznaczyć wielkości ryzyka w poszczególnych obszarach systemu produkcyjnego korzystając z wzorów (5.2) do (5.4):

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} = \frac{0}{168} = 0$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} = \frac{0}{168 - 0} = 0$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} = \frac{14}{168 - 0 - 0} = 0,08$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3} = \frac{21}{168 - 0 - 0 - 14} = 0,14$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21} = 0$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} = \frac{0}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0} = 0$$

$$R_7 = \frac{S_7}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 - S_6} = \frac{4,2}{138 - 0 - 0 - 14 - 21 - 0 - 0} = 0,04$$

Ryzyko całkowite R_c , zgodnie za wzorem (5.1), będzie wynosić:

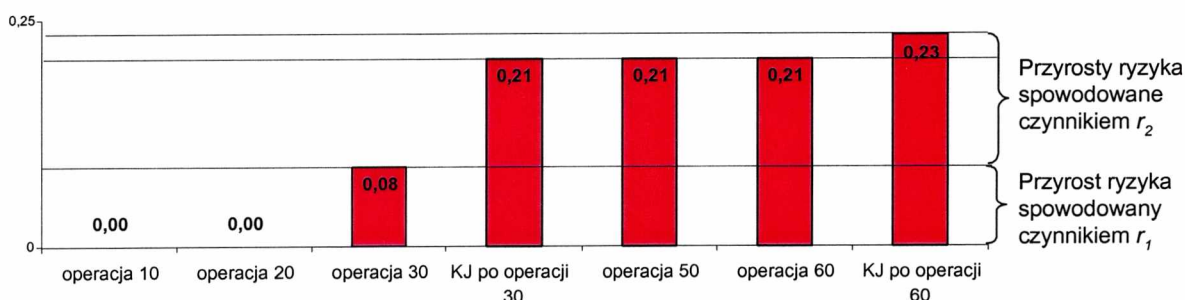
$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4)(1 - R_5)(1 - R_6)(1 - R_7)] = 0,23$$

lub przy pomocy wzoru (5.8):

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_7}{T - \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3 - \Delta t_4 - \Delta t_5 - \Delta t_6})] = 0,23$$

Otrzymana wartość ryzyka całkowitego R_c oznacza, że z prawdopodobieństwem 0,23 nie jest możliwa realizacja celu postawionego przed systemem produkcyjnym, czyli produkcja 650 sztuk korpusu belki bujakowej rocznie.

Rysunek 52 przedstawia przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych obszarach procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej. Ryzyko w obszarze O_7 odpowiada ryzyku całego procesu, ponieważ zawiera wszystkie czynniki ryzyka.



Rys. 52. Przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych obszarach systemu spowodowane oddziaływaniem czynników r_1 i r_2

Największy przyrost ryzyka, o 0,11, występuje w obszarze O_4 (kontrola jakości po operacji 30). Chcąc obniżyć całkowite ryzyko procesu należałoby w pierwszej kolejności podjąć działania naprawcze w tym obszarze.

ETAP 9. Uwzględnienie wag w metodzie

Ponieważ prezentowany tu przykład miał na celu jedynie ogólne przedstawienie możliwości wykorzystania metodyki planowania i oceny ryzyka w systemach produkcyjnych, został zaprezentowany w znacznym uproszczeniu i ograniczono go do poziomu procesu wytwórczego z pominięciem organizacji tego procesu. Zaproponowane w niniejszej pracy konstrukcje współczynników wagowych odnoszą się do poziomu organizacji systemu produkcyjnego uniezależniając od niego wyznaczoną wielkość ryzyka. W związku z tym etap 9 metodyki, czyli uwzględnienie współczynników wagowych w metodzie, zastosowanie zaprezentowane w rozdziale 8, gdzie dokonano weryfikacji opracowanej metodyki w przedsiębiorstwie przemysłowym.

Jak przedstawiono w powyższym przykładzie, opracowana metodyka aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych pozwala na wyznaczenie wielkości ryzyka dla całego analizowanego systemu produkcyjnego jak i dla jego poszczególnych obszarów. Jest to jej niewątpliwa zaleta, dająca wymierne korzyści praktyczne. Wyznaczenie obszaru o najwyższym poziomie zakłóceń daje możliwość, w krótkim czasie, opracowania programu naprawczego obniżającego poziom ryzyka w całym systemie produkcyjnym. Również możliwość dowolnej dekompozycji systemu na elementy składowe, w zależności od celu prowadzonej analizy, powinna stanowić zaletę w zastosowaniach praktycznych, gdyż nie wprowadza żadnych ograniczeń metodologicznych w stosowaniu metodyki.

W kolejnych rozdziałach pracy metodyka zostanie zweryfikowana poprzez zastosowanie w przedsiębiorstwie przemysłowym oraz porównanie z wybraną metodą ilościową proponowaną w literaturze i opisaną w rozdziale 1.

Rozdział 6. Charakterystyka systemu produkcyjnego oraz wyników uzyskanych podczas realizacji projektu

Opisano warunki, sposób realizacji, cele oraz wyniki uzyskane podczas realizacji projektu w przedsiębiorstwie przemysłowym. Scharakteryzowano system produkcyjny. Z uwagi na obszerność tematyczną projekt został podzielony na części. Ponieważ wyniki części wcześniejszych stanowiły dane wejściowe dla kolejnych części, a weryfikacja metodyki stanowiła ostatnią część projektu, to niniejszy rozdział jest opisem sposobu realizacji oraz uzyskanych wyników pierwszych części projektu.

Do weryfikacji metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych, zaproponowanej w rozdziale 5, posłużył projekt zrealizowany we wrocławskim oddziale międzynarodowego koncernu. Oddział ten jest trzecim co do wielkości w koncernie i zajmuje się produkcją lokomotyw elektrycznych, wagonów towarowych, wagonów pasażerskich, pociągów regionalnych, tramwajów i wagonów metra [80]. W jego skład wchodzi następujące zakłady:

- wózków,
- lokomotyw,
- pudeł,
- serwisu.

Z uwagi na dużą ilość zadań wyznaczonych do realizacji całość projektu, podzielono na trzy części. Wyniki części wcześniejszych stanowiły dane wejściowe do części następnych. Ponieważ planowanie i ocena ryzyka systemu produkcyjnego została przeprowadzona w części ostatniej, dlatego w niniejszym rozdziale zostanie opisany jedynie sposób realizacji i uzyskane wyniki w pierwszych dwóch częściach, natomiast weryfikacja metodyki zostanie opisana w rozdziale 7.

6.1 Warunki realizacji i cele poszczególnych części projektów

Projekt zrealizowano w 2002 roku, a jego celem była weryfikacja zdolności produkcyjnych założonych na lata 2004-2005. Potrzeba przeprowadzenia weryfikacji spowodowana była zmianą programu i profilu produkcji w związku z programem restrukturyzacji i dostosowania zakładu do wymogów koncernu. Przeprowadzenie tych zmian z jednej strony miało zapewnić stabilność produkcji, bez względu na koniunkturę gospodarczą, z drugiej zaś wiązało się z koniecznością rozbudowy zakładu oraz zmianą profilu produkcji z wózków na ramy wózków.

Program restrukturyzacji zakładał w latach 2004-2005 zwiększenie zdolności produkcyjnych z 400 do 1700 sztuk ram rocznie. Dodatkowo zaplanowano uruchomienie produkcji 7-miu nowych produktów. W sumie w latach 2004–2005 produkowanych miało być 11 wyrobów na 10-ciu liniach produkcyjnych. Specyfika produkcji, związana z czasochłonnością przebrojeń, wymagała uruchomienia 7-miu nowych linii produkcyjnych dla każdego typu ramy oraz określenia możliwości zamienności oprzyrządowania dla dodatkowego wyrobu.

Dużym utrudnieniem była konieczność analizy procesów produkcyjnych 11 różnych wyrobów. W przypadku 7 wyrobów planowanych do uruchomienia, w momencie rozpoczęcia realizacji projektu nie była ich znana technologia. Ponieważ jednak, zarówno technologia, jak i organizacja wszystkich procesów produkcyjnych w zakładzie jest podobna, postanowiono przeprowadzić analizę dla wyrobu reprezentatywnego, a w przypadku pozostałych wyrobów zastosować tzw. współczynniki przeliczeniowe. Współczynniki te określają podobieństwo konstrukcyjno-technologiczne w stosunku do projektu znanego i uważanego za reprezentatywny. Tabela 29 przedstawia założenia planu sprzedaży na 2005 rok, potrzebne wydajności do jego realizacji oraz przyjęte współczynniki przeliczeniowe [24].

Tabela 29. Założony na 2005 rok plan sprzedaży oraz przyjęta technologia [24]

LP.	NAZWY PROJEKTÓW	ILOŚCI	WYDAJNOŚĆ [szt./tydz.]	WSPÓŁ. PRZELICZ.
RAMY LOKOMOTYWOWE		300		
1	Projekt BR 185	100	2,6	1,7 x MD 523
2	Projekt Blue Tiger	50	1,3	1,9 x MD 523
3	Projekt ICE	150	3,8	1,6 x MD 523
RAMY REGIONALNE		900		
1	Projekt MD 523	400	10	produkt reprezentatywny
2	Projekt Goerlitz	300	7,6	1,4 x MD 523
3	Projekt BR 481	200	5,1	1,2 x MD 523
RAMY TRAMWAJOWE		300		
1	Projekt Cityrunner	100	2,6	1,1 x MD 525
2	Tramwaj 1	100	2,6	1,1 x MD 525
3	Tramwaj 2	100	2,6	1,1 x MD 525
MML KOMPONENTY BELKI + CZOPY		200		
1	Planowany 1	100	10	0,4 x MD 523
2	Planowany 2	100	10	0,4 x MD 523
		Σ 1700		

Przedstawiona w tabeli 29 wydajność oraz planowana produkcja liczby sztuk rocznie, stanowi odpowiednik założonego celu projektu. Jak przedstawiono to w punkcie 3.4.1 pracy, w przypadku wskaźników produktywności, wydajności, zdolności

produkcyjnej i mocy produkcyjnej, odnoszących się do zasobów (stanowisk pracy, maszyn i ludzi), są z sobą utożsamiane. Dlatego też w dalszej części pracy nazwy tych wskaźników będą używane zamiennie.

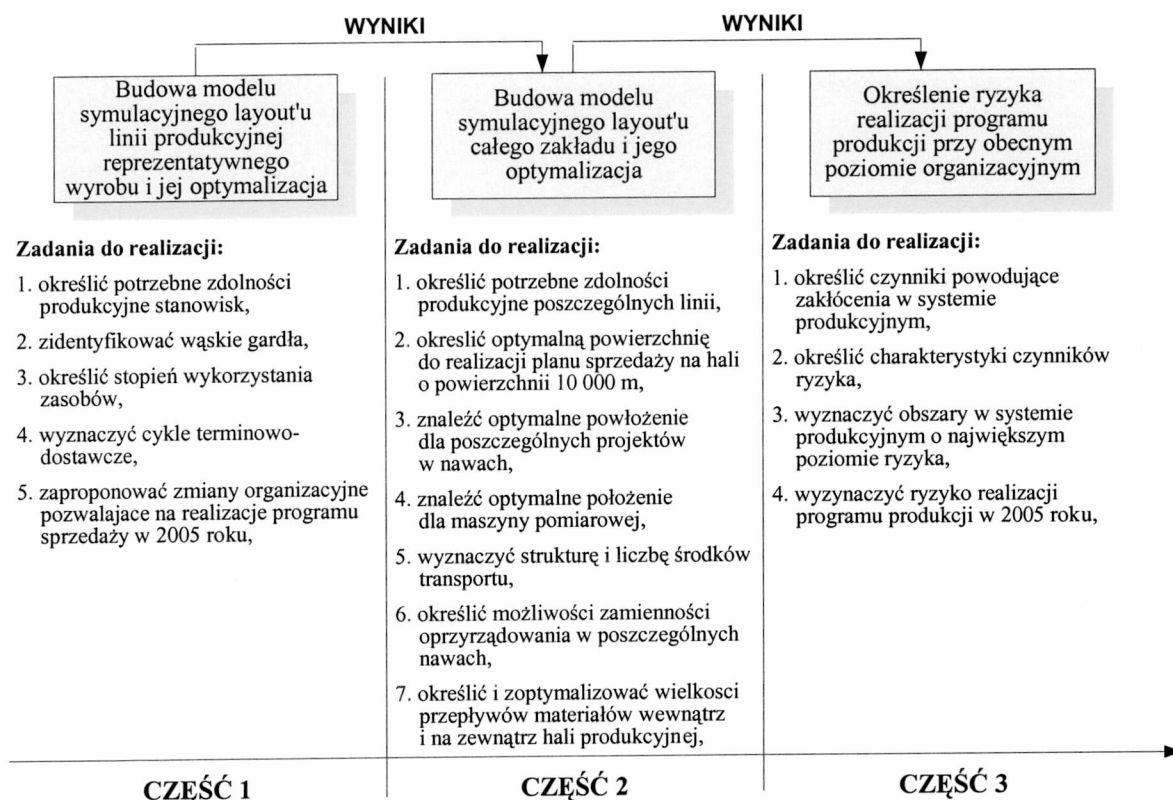
W związku z koniecznością rozbudowy zakładu za podstawowe zadania do realizacji przyjęto opracowanie, analizę, optymalizację layout'u i parku maszynowego, przy określonych na lata 2004-2005 zdolnościach produkcyjnych oraz określenie ryzyka produkcji ram wózków dla tak zaprojektowanych linii produkcyjnych i przy obecnym poziomie organizacyjnym. W tym celu postanowiono posłużyć się symulacją wariantową, a całość projektu podzielono na trzy następujące części:

CZĘŚĆ [1] Budowa modelu layout'u linii produkcyjnej reprezentatywnego wyrobu i jej optymalizacja w celu osiągnięcia zdolności produkcyjnych w 2005 roku.

CZĘŚĆ [2] Budowa modelu layout'u całego zakładu i jego optymalizacja w celu osiągnięcia zdolności produkcyjnych w 2005 roku.

CZĘŚĆ [3] Określenie ryzyka realizacji programu produkcji wyrobu reprezentatywnego oraz nowo zaprojektowanego systemu produkcyjnego przy obecnym poziomie organizacyjnym.

Rysunek 53 przedstawia sposób realizacji poszczególnych części projektu, oraz zadania wyznaczone do realizacji w poszczególnych jego częściach.

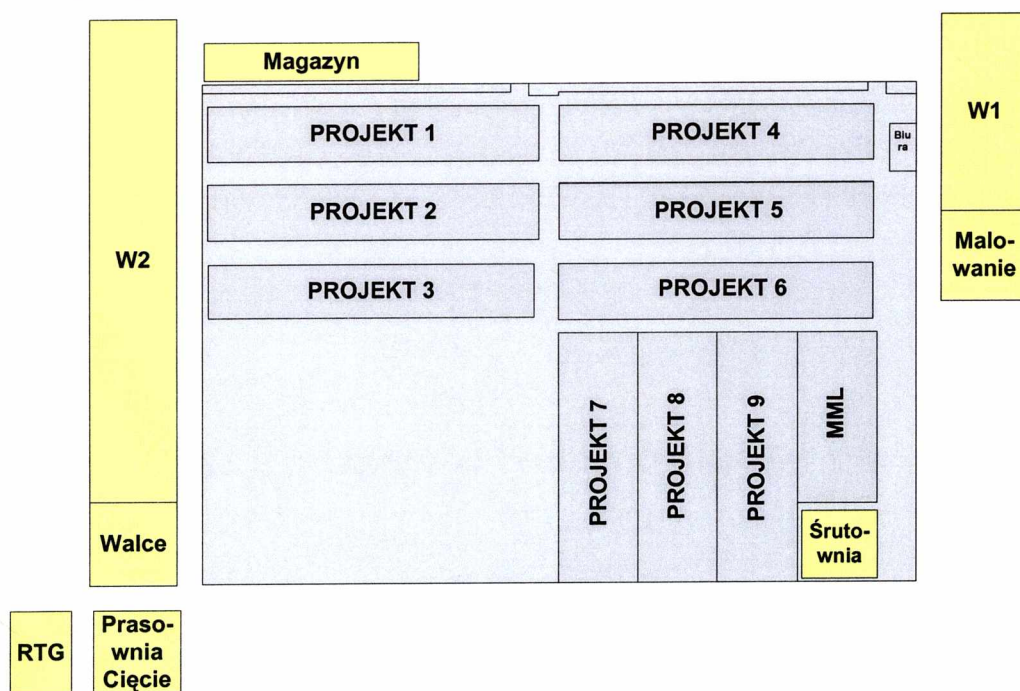


Rys. 53. Części projektu oraz zadania wyznaczone do realizacji

Z uwagi na potrzebę kompleksowej analizy problemu oraz jego złożoność, w realizacji projektu niezbędne było zastosowanie informatycznych narzędzi do symulacji i optymalizacji systemów produkcyjnych. Różna specyfika części projektu oraz mnogość analizowanych w nich zagadnień spowodowały, że do realizacji części [1] i [2] wykorzystano pakiet symulacyjny ProModel 2002, a w części [3] pakiet iGrafx 2003 for Six Sigma.

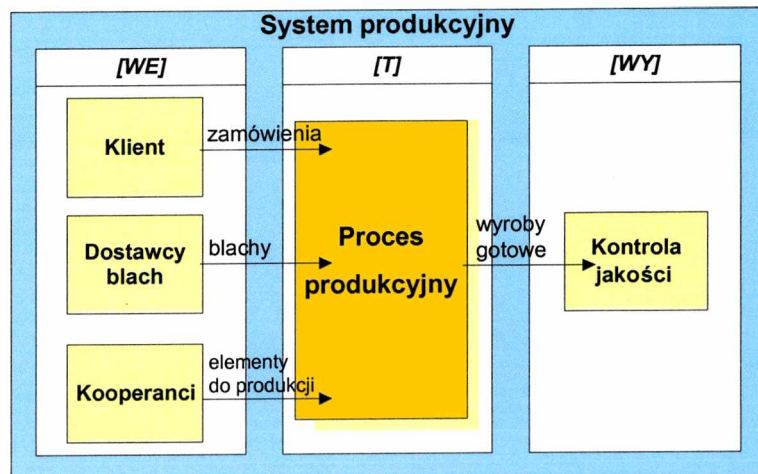
6.2 Charakterystyka systemu produkcyjnego i produktu reprezentatywnego

Produkcja w 2005 roku ma się odbywać na hali produkcyjnej o powierzchni 10 000 m². Z uwagi na czasochłonne przebrojenie, rozmiary produktów, stanowisk pracy oraz specjalistyczne oprzyrządowanie, produkcja poszczególnych typów ram odbywa się na wydzielonych liniach produkcyjnych (nawach hali). W trakcie procesu produkcyjnego wyroby lub ich elementy składowe kilkakrotnie wywożone są na zewnątrz hali na operacje zewnętrzne lub do kooperacji. Transport elementów wewnątrz naw odbywa się za pomocą suwnic, a poza nimi za pomocą wózków. Na rysunku 54 przedstawiono projekt rozmieszczenia naw produkcyjnych oraz plan sytuacyjny zakładu z zaznaczonymi operacjami zewnętrznymi. Ponieważ produkcja planowana jest jedynie na 10-ciu nawach produkcyjnych, a w 2005 roku wytwarzanych będzie 11 wyrobów, zgłoszono potrzebę znalezienia naw, na których istniała by możliwość zamienności oprzyrządowania dla dodatkowego wyrobu.



Rys. 54. Plan zakładu oraz wstępny projekt usytuowania naw produkcyjnych na hali [26]

Wejścia do systemu produkcyjnego stanowią m.in. zamówienia klienta, blachy i komponenty dostarczane od dostawców blach i kooperantów, wyjściami są natomiast wyroby gotowe, poddawane kontroli jakości. Schemat systemu produkcyjnego analizowanego przedsiębiorstwa przedstawia rysunek 55.



Rys. 55. Schemat systemu produkcyjnego analizowanego przedsiębiorstwa

Poniżej opisano poszczególne elementy systemu produkcyjnego z rysunku 55.

Klient

Z uwagi na specyfikę produktów z klientami podpisywane są długoterminowe umowy, w oparciu o które sporządzany jest plan sprzedaży. Jest on podstawą do planowania produkcji, dostaw blach i innych komponentów oraz podpisywania umów z kooperantami. Z uwagi na restrykcyjne normy bezpieczeństwa kolejowego w poszczególnych krajach, zdarza się że klient żąda zmiany konstrukcyjnej lub technologicznej wyrobu.

Dostawcy blach

Również zamówienia na blachy wysyłane są na podstawie długoterminowych umów z hutami. Czas realizacji zamówienia wynosi 2 tygodnie. Po przyjeździe dostawy, blachy ewidencjonuje się w zintegrowanym systemie informatycznym - Baan. Czas ewidencji wynosi od 1 do 3 dni. Równocześnie dostawy są sprawdzane pod względem:

- a) zgodności z zamówieniem,
- b) jakości,
- c) kompletu dokumentacji.

W przypadku niekompletnej dokumentacji blachy są składowane w magazynie, jednak do czasu wyjaśnienia i wystawienia faktury nie mogą być wykorzystywane w procesie produkcyjnym. Planowy okres kontroli dostawy, od zarejestrowania w systemie

do wystawienia faktury, trwa 3 dni. W przypadku wydłużenia się tego okresu można mówić o wystąpieniu nieprawidłowości z punktu a, b lub c.

Kooperacja

Jeśli dostawa blach przejdzie pomyślnie proces kontroli, to kolejnym etapem jest wysłanie blach do poddostawców, u których odbywają się zewnętrzne procesy obróbcze (np. wypalanie, cięcie, frezowanie, wiercenie itd.) i wytwarzane są potrzebne komponenty do produkcji. Zwykle czas przygotowania elementów u poddostawców trwa 2 tygodnie, a wielkość partii odpowiada liczbie elementów przypadającej na zlecenie produkcyjne. Jedynie w przypadku elementów drobnych wielkości partii są większe. Podobnie jak w przypadku dostaw blach, po przyjęciu od kooperacji dostawy są podlegają kontroli.

Proces produkcyjny

Głównymi operacjami procesu produkcyjnego są operacje:

- pasowania,
- szepiania,
- spawania,
- szlifowania.

W trakcie procesu elementy kilkakrotnie wywożone są na operacje zewnętrzne:

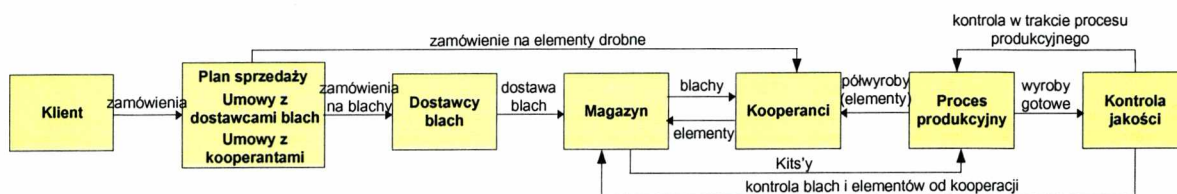
- malowanie,
- śrutowanie,
- prasowanie,
- kontrolę jakości,
- do kooperantów.

Całość produkcji sterowana jest za pomocą tzw. kits'ów, zawierających części i komponenty potrzebne do produkcji kompletnej ramy. Kits'y kompletowane są w magazynie i dostarczane na wydzielone miejsca na hali produkcyjnej, a ich liczba zależy od stopnia złożoności wyrobu.

Kontrola jakości

W trakcie procesu produkcyjnego kontrola jakości odbywa się po każdej operacji szepiania i spawania i trwa 20 min. $\pm$ 5 min. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości element naprawiany jest na stanowisku, na którym błąd został stwierdzony. Kontrolę tę przeprowadzają kontrolerzy jakości. W zakładzie zatrudnionych jest trzech kontrolerów pracujących na pierwszej zmianie. Po procesie produkcyjnym następuje kontrola ostateczna na maszynie pomiarowej. Kontrola ta trwa od 8 do 12 godzin, w zależności od produktu.

Opisane powyżej etapy procesu produkcyjnego i jego przebieg przedstawia rysunek 56.



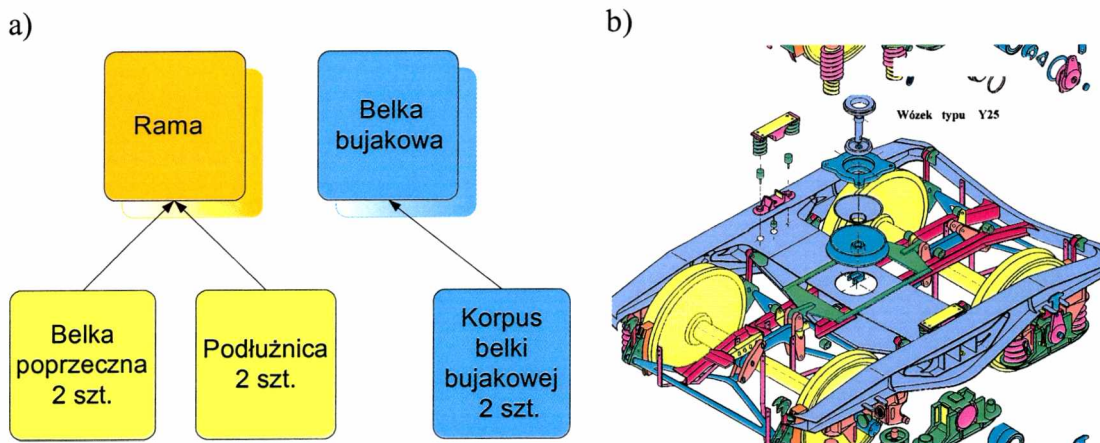
Rys. 56. Etapy procesu produkcyjnego [17]

W części [1] projektu analizie został poddany wyrób reprezentatywny. Na wyrób reprezentatywny wybrano ramę MD 523 z uwagi na wcześniejszy duży jej wolumen produkcji, konieczność zwiększenia go do 400 sztuk rocznie oraz dobrą znajomość procesu produkcyjnego. Rama jest częścią wózka MD 523, przeznaczonego do wagonów pasażerskich. W omawianym zakładzie produkowana jest jedynie rama, a całościowa produkcja wózka MD 523 odbywa się w innych zakładach koncernu.

Na całość operacji, związanych z produkcją ramy MD 523, składa się pięć odrębnie realizowanych procesów, w wyniku których powstają główne podzespoły do montażu. Są to:

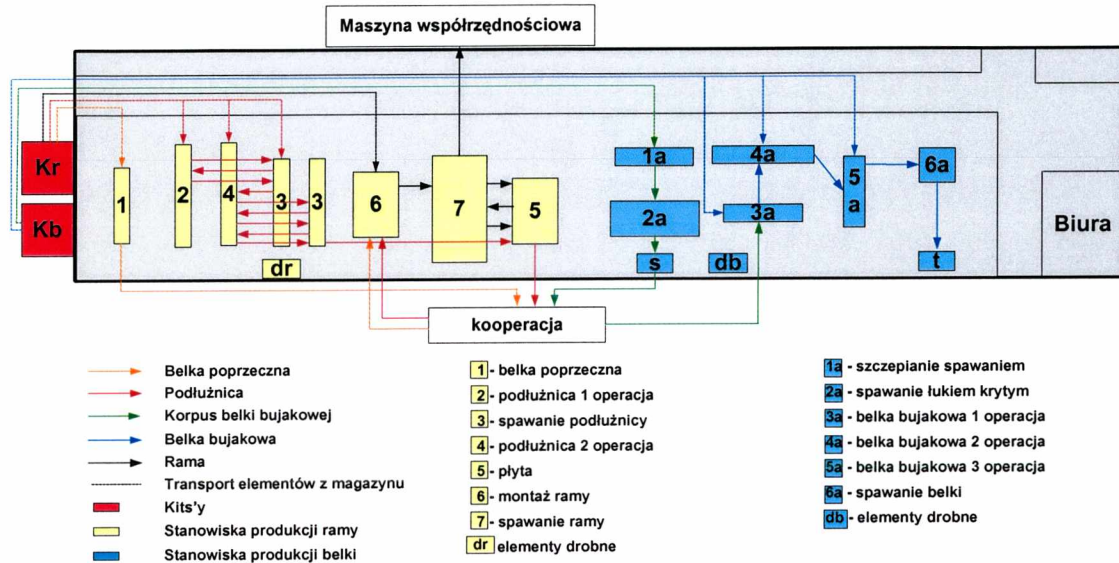
- proces produkcji belki poprzecznej,
- proces produkcji podłużnicy,
- proces produkcji belki bujakowej,
- proces produkcji korpusów belki bujakowej,
- proces produkcji ramy wózka.

Rysunek 57 a) przedstawia uproszczoną strukturę produktu. Struktura szczegółowa, uwzględniająca kolejne operacje, stanowiska montażowe i poszczególne elementy, została zaprezentowana w Załączniku 2. Rysunek 57 b) przedstawia wózek MD 523 wraz z elementami składowymi



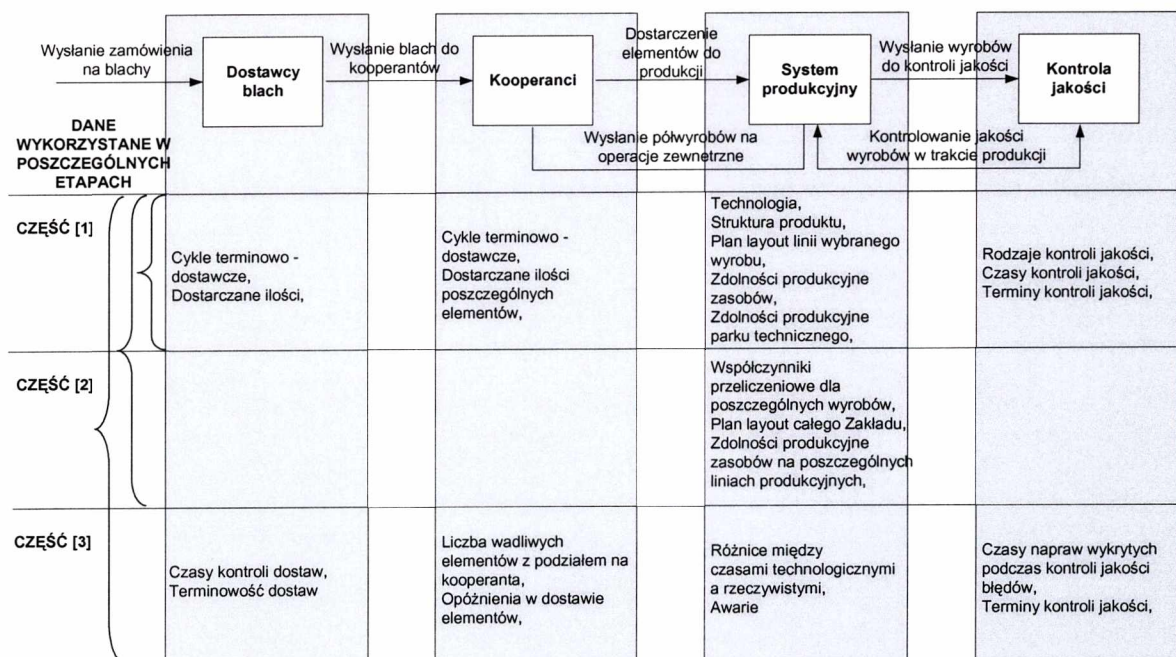
Rys. 57. Uproszczona struktura ramy MD 523 (a); wózek MD 523 wraz z elementami składowymi (b)

Layout linii produkcyjnej, na której odbywała się produkcja ramy MD 523 w momencie rozpoczęcia realizacji projektu, przedstawia rysunek 58. Zaznaczono na nim stanowiska produkcyjne oraz przepływy materiałowe w procesie produkcji podzespołów i ramy.



Rys. 58. Pierwotny layout linii produkcyjnej ramy MD 523

W zależności od realizowanej części projektu przeanalizowano różne obszary systemu produkcyjnego oraz różne dane występujące w tych obszarach. Poszczególne obszary, wraz z analizowanymi w nich danymi, schematycznie przedstawia rysunek 59.



Rys. 59. Obszary systemu produkcyjnego i przeanalizowane w nich dane

6.3 Sposób realizacji i wyniki uzyskane w części [1] projektu –optymalizacji layout'u linii produkcyjnej wyrobu reprezentatywnego

Celem tej części projektu była budowa modelu layout'u linii produkcyjnej reprezentatywnego wyrobu i jej optymalizacja w celu osiągnięcia założonych zdolności produkcyjnych w 2005 roku. Realizacja polegała na budowie szeregu wariantów modeli symulacyjnych layout'u linii produkcyjnej ramy wózka MD 523 w pakiecie symulacyjnym ProModel 2002. Analiza wyników pozwoliła na opracowanie propozycji zmian organizacyjnych oraz na ich weryfikację, tak aby możliwe było osiągnięcie założonych zdolności produkcyjnych w 2005 roku. Dodatkowo model końcowy został zoptymalizowany w zakresie:

- długości dróg transportowych,
- ilości środków transportu,
- wykorzystania zasobów produkcyjnych,
- powierzchni linii produkcyjnej.

We wszystkich zbudowanych modelach uwzględniono m.in.:

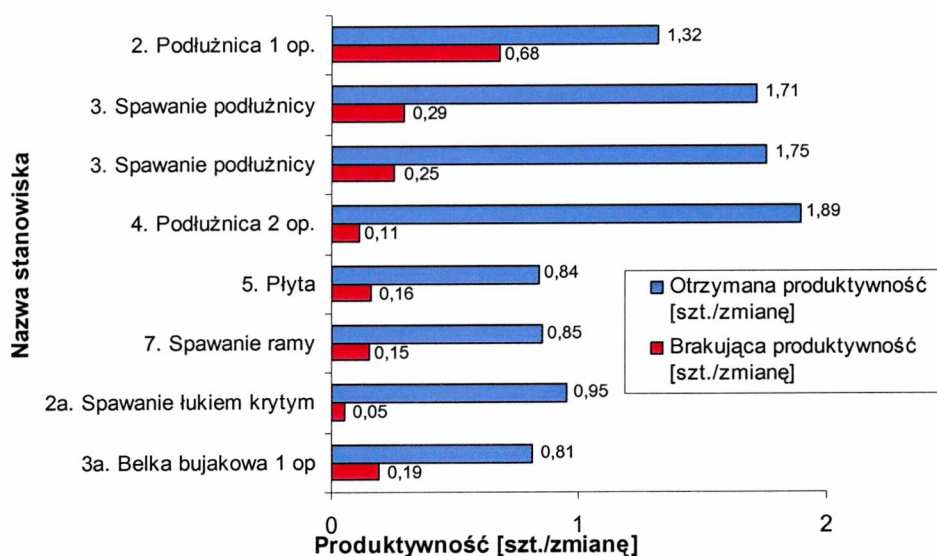
- czasy technologiczne produkcji wszystkich komponentów, wynikających ze struktury produktu oraz wszystkie czasy przygotowawcze,
- rzeczywiste wymiary nawy i hali produkcyjnej, z uwzględnieniem położenia słupów konstrukcyjnych, stanowisk pracy oraz odległości pomiędzy stanowiskami,
- rzeczywiste odległości pomiędzy halą produkcyjną a operacjami zewnętrznymi,
- rzeczywiste parametry ruchu dla środków transportu.

Pierwszy model symulacyjny zbudowany został na podstawie pierwotnego layout'u, przedstawionego na rysunku 58. Analiza wyników symulacji pozwoliła na ustalenie m.in. czasu wykonania kompletnej ramy przy dostępnych zdolnościach produkcyjnych oraz czasu spływu pierwszej sztuki dla nowego wyrobu. Umożliwiła również wyznaczenie obciążeń dla stanowisk pracy i identyfikację wąskich gardeł, nie pozwalających na realizację założonego na 2005 rok planu sprzedaży. Jedynie osiem z osiemnastu występujących na linii stanowisk miało wystarczającą zdolność produkcyjną. Wyniki symulacji wskazywały problem zbyt długich i krzyżujących się dróg transportowych na hali oraz małe wykorzystanie suwnic w logistyce. Zestawienie uzyskanych wyników obciążenia stanowisk pracy i ich produktywności przedstawia tabela 30. Kolorem czerwonym zaznaczono brakującą produktywność.

Tabela 30. Zestawienie uzyskanych wyników obciążenia stanowisk pracy i ich produktywności

Nazwa stanowiska	Obciążenie [%]	Otrzymana produktywność [szt./zmianę]	Brakująca produktywność [szt./zmianę]
1. Belka poprzeczna	44,79	2,68	
2. Podłużnica 1 op.	45,52	1,32	0,68
3. Spawanie podłużnicy	75,33	1,71	0,29
3. Spawanie podłużnicy	73,57	1,75	0,25
4. Podłużnica 2 op.	67,21	1,89	0,11
5. Płyta	61,24	0,84	0,16
6. Montaż ramy	41,08	1,93	
7. Spawanie ramy	99,99	0,85	0,15
1a. Szczipanie spawaniem	54,18	1,03	
2a. Spawanie łukiem krytym	59,03	0,95	0,05
3a. Belka bujakowa 1 op.	100	0,81	0,19
4a. Belka bujakowa 2 op.	35,34	2,09	
5a. Belka bujakowa 3 op.	3,18	10	
6a. Spawanie belki	8,42	6,19	
Stanowisko S	14,91	5,32	
Stanowisko T	15,75	4,03	

Na rysunku 60 przedstawiono wykres produktywności uzyskanej i brakującej dla wybranych stanowisk.

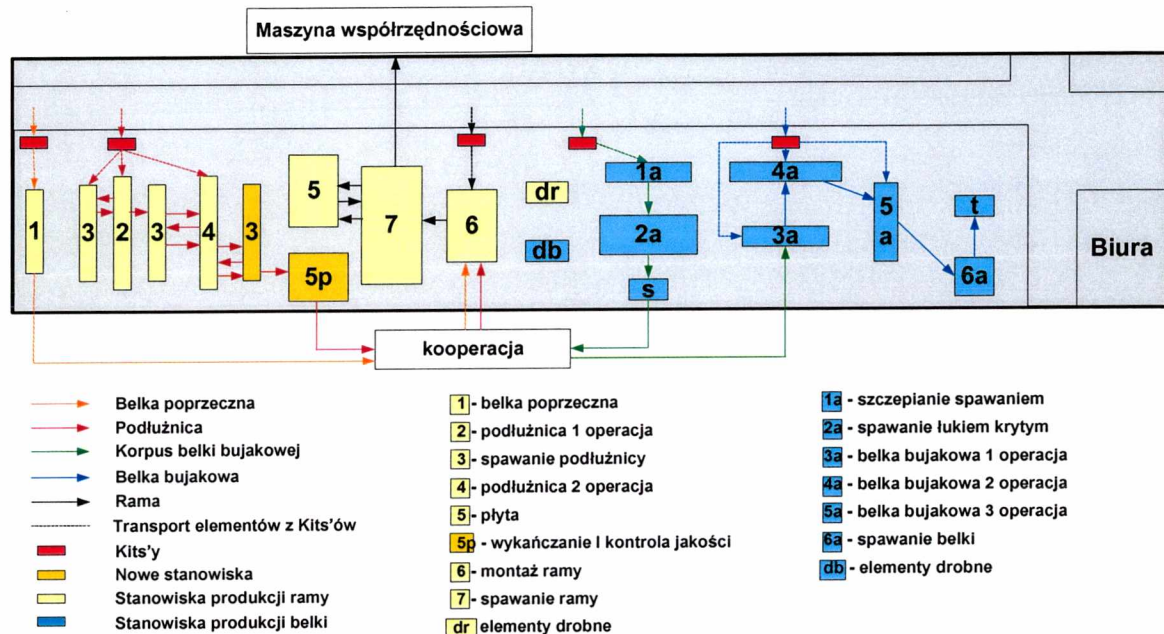


Rys. 60. Zestawienie produktywności, otrzymanej i brakującej, dla wybranych stanowisk

W celu likwidacji wąskich gardeł i poprawy produktywności opracowano zmiany organizacyjne, polegające na zatrudnieniu dodatkowego pracownika, zakupie dodatkowego stanowiska lub wprowadzeniu trzeciej zmiany, w zależności od przewidywanych kosztów inwestycji. Wprowadzono również nowy podział operacji technologicznych między stanowiska pracy oraz zdecydowano o przesunięciu kontroli jakości ze stanowiska na głównej linii produkcyjnej. Dla tak zaprojektowanej wersji layout'u przeprowadzono optymalizację pod względem długości dróg transportowych oraz

wykorzystania środków transportu. Z uwagi na koszty transportu wybrano wersję, w której wózki transportowe, jako zasób krytyczny, pokonują krótszą drogę, a większa część transportu odbywa się za pomocą suwnic.

Ostatecznie przyjętą wersję layout'u wraz z zaakceptowanymi zmianami organizacyjnymi, pozwalającymi na realizację planu sprzedaży w 2005 roku, zoptymalizowaną pod względem zajmowanej powierzchni i przemieszczeń elementów za pomocą wózków przedstawia rysunek 61.



Rys. 61. Zoptymalizowany i zaakceptowany plan layout ramy MD 523

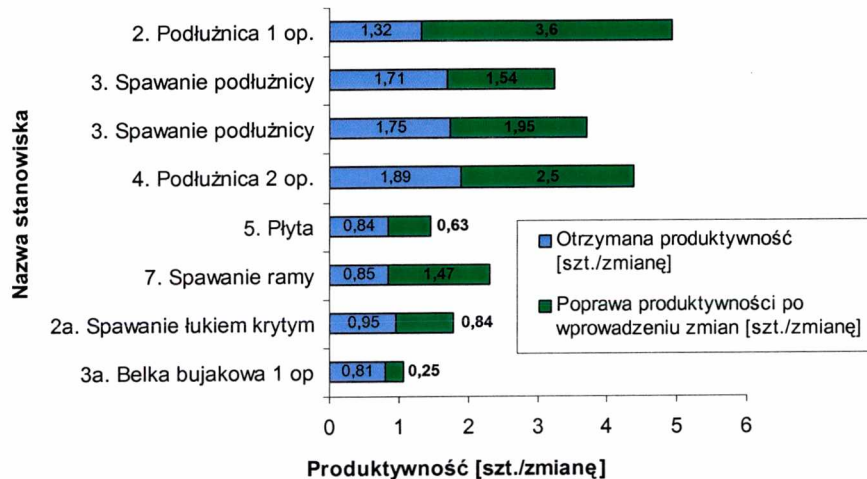
Zestawienie uzyskanych wyników symulacji obciążenia stanowisk pracy i ich produktywność zoptymalizowanego layout'u i przedstawia tabela 31.

Tabela 31. Zestawienie uzyskanych wyników obciążeń stanowisk pracy i ich produktywności

Nazwa stanowiska	Obciążenie [%]	Otrzymana produktywność [szt./zmianę]	Poprawa produktywności po wprowadzeniu zmian [szt./zmianę]
1. Belka poprzeczna	49,34	2,67	
2. Podłużnica 1 op.	44,58	4,92	3,6
3. Spawanie podłużnicy	38,85	3,25	1,54
3. Spawanie podłużnicy	65,93	3,7	1,95
3. Spawanie podłużnicy	70,83	3,5	
4. Podłużnica 2 op.	58,46	4,39	2,5
5. Płyta	54,38	1,47	0,63
5p. Płyta wykańczanie	26,22	4,39	
6. Montaż ramy	41,83	1,86	
7. Spawanie ramy	64,94	2,32	1,47
1a. Szczipianie spawaniem	84,21	1,85	
2a. Spawanie łukiem krytym	87,43	1,79	0,84

3a. Belka bujakowa 1 op.	91,01	1,06	0,25
4a. Belka bujakowa 2 op.	33,27	2,27	
5a. Belka bujakowa 3 op.	12,23	4,96	
6a. Spawanie belki	8,64	6,22	
Stanowisko S	30,71	4,22	
Stanowisko T	16,26	4,04	

Na rysunku 62 przedstawiono wykres uzyskanej produktywności i jej poprawy po wprowadzonych zmianach na wybranych stanowiskach pracy.



Rys. 62 Zestawienie produktywności, otrzymanej i po wprowadzonych zmianach, dla wybranych stanowisk

Uzyskane w tej części wyniki potwierdzają słuszność wprowadzonych na linii produkcyjnej ramy wózka MD 523 zmian organizacyjnych. W następnej części projektu zmiany te pozwolą na zastosowanie analogicznych zmian na pozostałych nawach i optymalizację całego zakładu pod względem długości dróg transportowych.

6.4 Sposób realizacji i wyniki uzyskane w części [2] projektu –optymalizacji layout'u całego zakładu

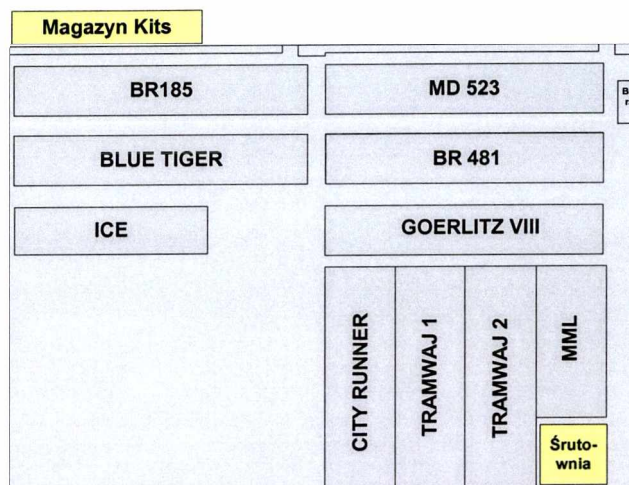
Celem drugiej części projektu było zaprojektowanie layout'u całego zakładu oraz wprowadzenie zmian organizacyjnych, pozwalających na realizację planu sprzedażny założonego na 2005 rok. Optymalizacja layout'u miała zostać przeprowadzona w zakresie:

- przypisania poszczególnych projektów do naw, z uwzględnieniem długości dróg transportowych wewnątrz i na zewnątrz hali produkcyjnej,
- położenia maszyny pomiarowej,
- obciążeń dróg transportowych wewnątrz i na zewnątrz hali produkcyjnej,
- ilości środków transportu.

Również w tej części projektu do budowy i optymalizacji layout'u zakładu wykorzystano pakiet symulacyjny ProModel 2002. Z uwagi na pracochłonność związaną z budową modeli dla aż 11-tu wyrobów, zdecydowano się wykorzystać wyniki uzyskane

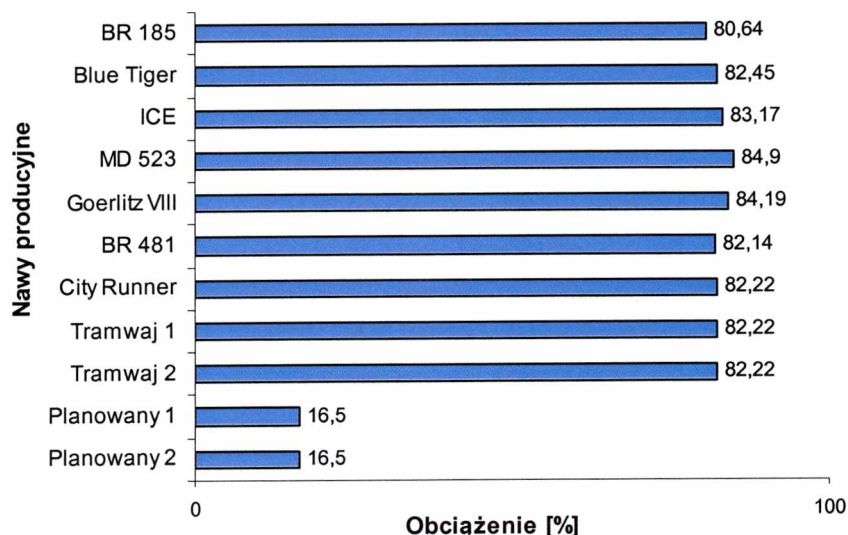
w [1] części projektu oraz zastosować współczynniki przeliczeniowe, określające podobieństwo w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, zanalizowanego w [1] części projektu. Wartości tych współczynników dla poszczególnych wyrobów przedstawia tabela 29. Dodatkowymi zadaniami w tej części było znalezienie możliwości zamienności oprzyrządowania dla dodatkowego projektu, znalezienie optymalnego położenia dla maszyny pomiarowej oraz wyznaczenie obciążeń dróg transportowych wewnątrz i na zewnątrz hali produkcyjnej.

Na podstawie wyników symulacji różnych wersji modeli oraz przyjętych kryteriów optymalizacyjnych, ustalono najkorzystniejsze przypisanie projektów do naw produkcyjnych, pokazane na rysunku 63.



Rys. 63. Propozycja przypisania projektów do poszczególnych naw produkcyjnych [26]

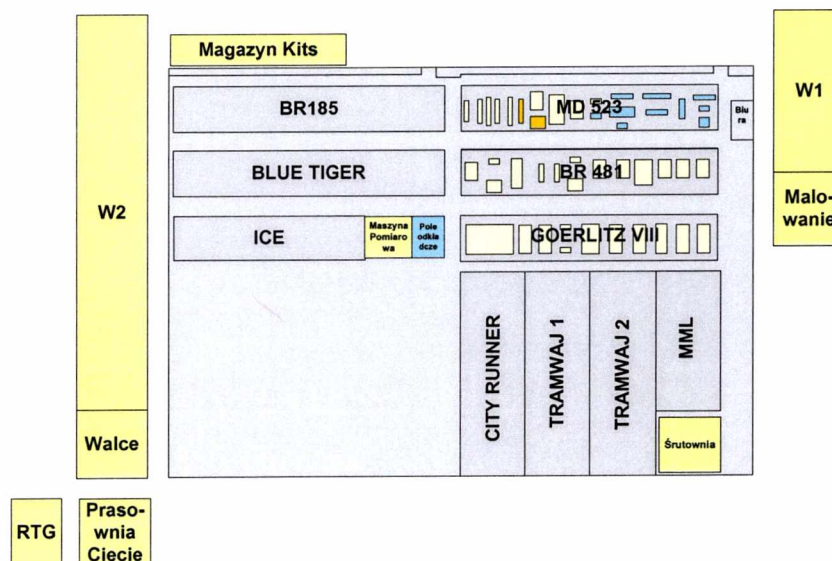
Dla tak zaprojektowanego layout'u zakładu, po wprowadzeniu zmian organizacyjnych analogicznych jak w [1] części projektu, obciążenia poszczególnych linii produkcyjnych przedstawiono na rysunku 64.



Rys. 64. Obciążenia poszczególnych naw produkcyjnych po wprowadzonych zmianach organizacyjnych

Z analizy obciążeń naw produkcyjnych wynika, że istnieje możliwość zamienności oprzyrządowania na linii MML, gdzie zamierza się uruchomić projekty Planowany 1 i Planowany 2. Łączne obciążenie nawy dla obu projektów wynosi 33%, co w skali roku daje możliwość przebrojenia i uruchomienia w tym miejscu dodatkowego projektu.

Wybierając optymalne położenie dla maszyny pomiarowej, zbudowano i zanalizowano cztery wersje layout'ów. Różnice między modelami polegały na położeniu maszyny pomiarowej (centralnym i skrajnym), liczbie środków transportu, wykorzystaniu wózków torowych oraz sposobie wywozu gotowych ram na badania RTG. Ostatecznie wybrano wersję z trzema wózkami transportowymi i z centralnym położeniem maszyny pomiarowej, co wydatnie skracało drogę jaką pokonują gotowe ramy z poszczególnych naw produkcyjnych. Wywóz ram do RTG mógł odbywać się dwoma drogami – przez bramę na końcu nawy ICE oraz przez bramę na końcu nawy CityRunner. Droga przez nawę CityRunner jest nieznacznie dłuższa, ale wózek widłowy nie przejeżdża przez żadną linię produkcyjną i porusza się szerszą drogą. Rysunek 65 przedstawia zaakceptowany przez zarząd zakładu plan layout.



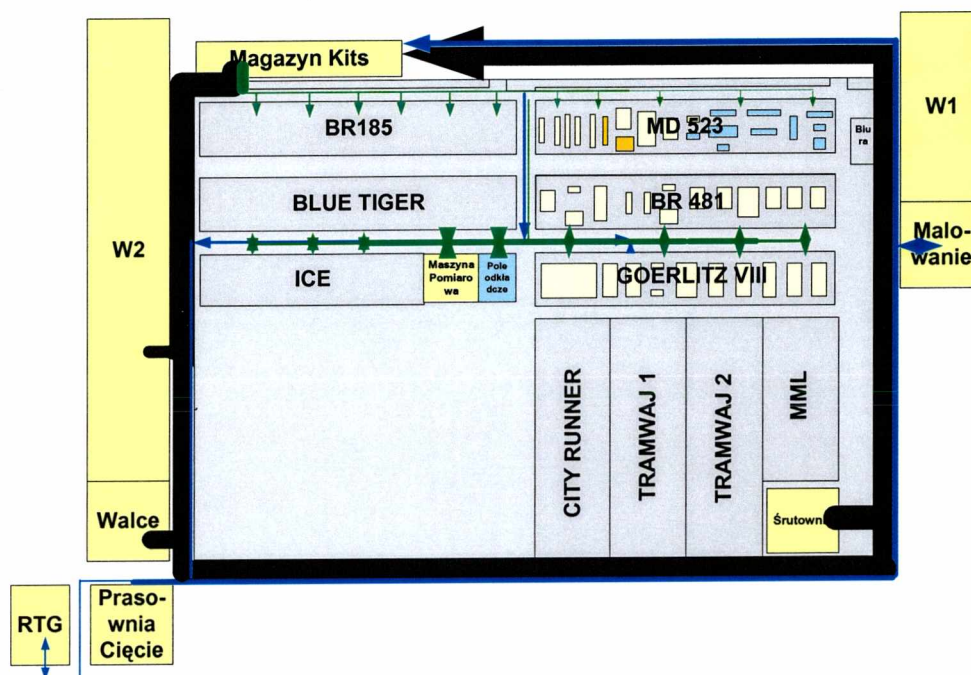
Rys. 65. Ostatecznie przyjęty plan layout zakładu

Dla wybranej na spotkaniu podsumowującym wersji layout'u sporządzono wykres Sankey'a (rysunek 66). Wykres ten obrazuje obciążenia poszczególnych odcinków dróg transportowych. Poszczególne grubości linii odzwierciedlają liczbę przejazdów wózka. Wprowadzono następujące przedziały:



Dodatkowo, w celu zwiększenia przejrzystości logiki transportowej, wyróżniono kolorami linii transport elementów gotowych, kits'ów oraz dostarczanie kits'ów na poszczególne linie produkcyjne:

- transport elementów gotowych (kolor niebieski),
- przygotowania kits'ów (kolor czarny),
- dostarczenie kitsów na poszczególne linie produkcyjne (kolor zielony).



Rys. 66. Wykres Sankey'a dla przyjętego planu hali produkcyjnej

Po analizie natężenia przepływu materiałów stwierdzono, że transportowanie elementów na zewnątrz hali spowodowałoby zmniejszenie natężenia ruchu o 76% wewnątrz hali produkcyjnej. Analiza wyników wykazała również, iż korzystne byłoby umieszczenie magazynu w pobliżu cięcia lub śrutowni. Uzasadnieniem dla tego rozwiązania są długie drogi transportowe pomiędzy magazynem, cięciem, walcami, prasami a śrutowaniem, przy jednoczesnym wysokim stopniu natężenia operacji transportowych. Jednak, z uwagi na koszty inwestycji, zmiana ta została odrzucona.

Przeprowadzona optymalizacja layout'u zakładu oraz wprowadzone zmiany organizacyjne opisane w [1] części projektu pozwalają na realizację założonego na 2005 rok planu sprzedaży. Jednak opisane powyżej dwie pierwsze części projektu opierają się jedynie na danych technologicznych i nie uwzględniają poziomu organizacji systemu produkcyjnego oraz pojawiających się w nim zakłóceń. Planowanie i ocena ryzyka dla tak zaprojektowanego systemu produkcyjnego, przy danym poziomie organizacji, zostanie przeprowadzona w rozdziale 7.

Rozdział 7. Weryfikacja metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych

Dla scharakteryzowanego w rozdziale 6 systemu produkcyjnego ram wózków przeprowadzono aplikację modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka. Oceny i planowania ryzyka dokonano przy wykorzystaniu danych pochodzących z przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych na modelach procesu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego oraz całego zakładu.

Potrzeba przeprowadzenia planowania i oceny ryzyka realizacji programu produkcji założonego na lata 2004 - 2005 wynikała z konieczności weryfikacji w warunkach rzeczywistych zdolności produkcyjnych nowozaprojektowanego systemu produkcyjnego. Poprzednie części projektu zawierały jedynie dane technologiczne oraz tylko niektóre elementy zarządzania i organizacji systemu produkcyjnego, pomijając zupełnie zakłócenia, które stale występują we wszystkich systemach produkcyjnych. Zgodnie z definicją systemu, przedstawioną w rozdziale 4, system to nie tylko proces technologiczny (przetwarzania T), lecz układ celowo zorganizowany, istniejący w otoczeniu, na który stale oddziałują losowo pojawiające się czynniki zakłócające.

Planowania i oceny ryzyka dokonano przy wykorzystaniu przedstawionej w rozdziale 5 metodyki. W analizie systemu produkcyjnego uwzględniono rzeczywiste czynniki zakłócające, bądź prawdopodobieństwa ich występowania i charakterystyki. Postanowiono, że tak jak poprzednio, szczegółowej analizie i ocenie ryzyka zostanie poddany wyrób reprezentatywny, czyli rama MD 523. Ryzyko całego zakładu, ze względu na dużą liczbę wyrobów, zostanie wyznaczone przy pomocy współczynników przeliczeniowych, wyników analizy ryzyka wyrobu reprezentatywnego oraz liczby wyrobów z planu sprzedaży (tabela 29). Poniżej zaprezentowany zostanie sposób realizacji części [3] projektu, zgodnie z etapami zaproponowanej metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych.

ETAP 1. Ustalenie poziomu analizy

Ze względu na sposób realizacji projektu zdecydowano się na następujące poziomy analizy:

- dla wyrobu reprezentatywnego – analiza na poziomie linii produkcyjnej (KPA^1),
- dla całego zakładu - analiza na poziomie wydziału (KPA^3).

ETAP 2. Zdefiniowanie celu

Za cel projektu przyjęto osiągnięcie zdolności produkcyjnych pozwalających na realizację założonego na lata 2004-2005 planu sprzedaży, przedstawionego w tabeli 29. Wprowadzone zmiany organizacyjne i przeprowadzona optymalizacja w części [1] i [2] projektu pozwala na osiągnięcie tego celu.

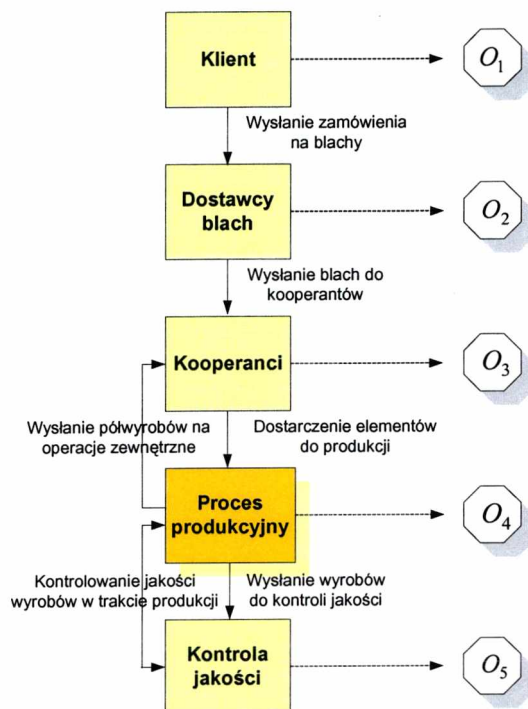
W metodyce planowania i oceny ryzyka, wyznaczając cel dla systemu produkcyjnego, należy brać pod uwagę nie wartości wskaźników wynikające z planu sprzedaży lecz wartości teoretycznie możliwe do osiągnięcia. Dla systemów produkcyjnych wartość teoretyczna ograniczona jest jedynie możliwościami technologicznymi. Dlatego, biorąc pod uwagę jedynie czasy technologiczne i transportu, przy założeniu pełnej niezawodności systemu, dostępności zasobów i 100% obciążenia linii produkcyjnych, za cel (W_{teoret}) przyjęto teoretycznie możliwą do osiągnięcia wydajność dla poszczególnych linii i przedstawiono ją w tabeli 32.

Tabela 32. Wydajność teoretyczna dla poszczególnych linii produkcyjnych – wartości celów [25]

NAZWY PROJEKTÓW	W_{teoret} / rok
Projekt BR 185	133
Projekt Blue Tiger	66
Projekt ICE	199
Projekt MD 523	530
Projekt Goerlitz VIII	398
Projekt BR 481	265
Projekt Cityrunner	133
Tramwaj 1	133
Tramwaj 2	133
Planowany 1	133
Planowany 2	133
Σ	2253

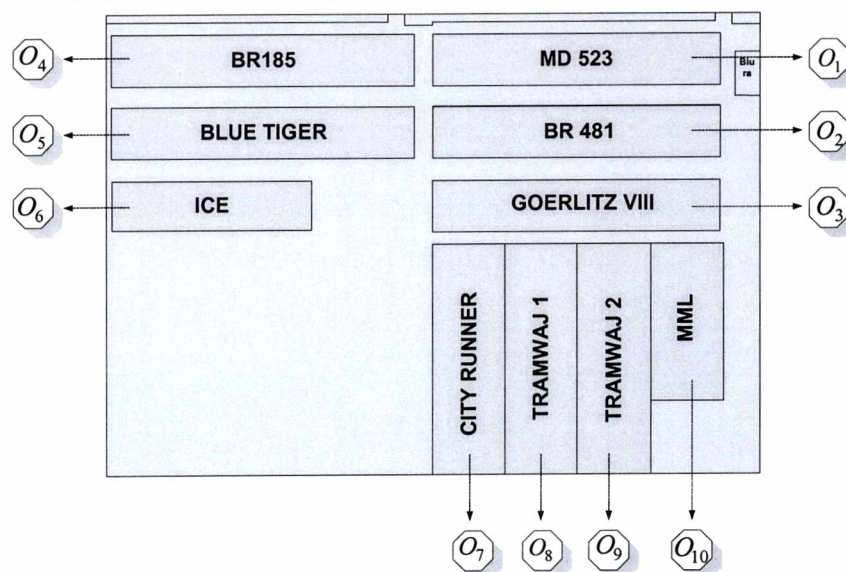
ETAP 3. Dekompozycja

Ustalono, że dla celu przeprowadzanej analizy ryzyka wyrobu reprezentatywnego najkorzystniej będzie zdekomponować system produkcyjny na obszary stanowiące jego etapy (zgodnie z rysunkiem 55 i opisem z punktu 6.2). Taka dekompozycja procesu pozwoli na wskazanie etapów procesu, w których występuje największe ryzyko. Pozwoli również na podjęcie działań w tych obszarach ograniczających poziom ryzyka. Dla tak wyróżnionych obszarów wprowadzono następujące oznaczenia przedstawione na rysunku 67.



Rys. 67. Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego

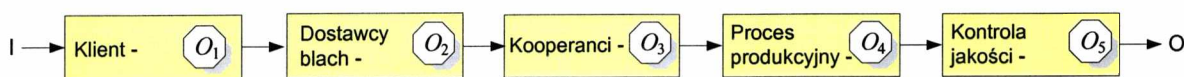
W analizie ryzyka całego zakładu zostaną wykorzystane, tak jak w części [2], współczynniki przeliczeniowe, wyniki z analizy ryzyka wyrobu reprezentatywnego oraz liczba planowanych do produkcji wyrobów (tabela 29). W związku z przyjętym w Etapie 1 metodyki poziomem analizy (KPA^3) oraz w celu wyznaczenia wyrobu o największym ryzyku, dekompozycja systemu produkcyjnego całego zakładu powinna zostać przeprowadzona na poszczególne linie produkcyjne. Dla takiej dekompozycji systemu wprowadzono następujące oznaczenia, przedstawione na rysunku 68.



Rys. 68. Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego całego zakładu

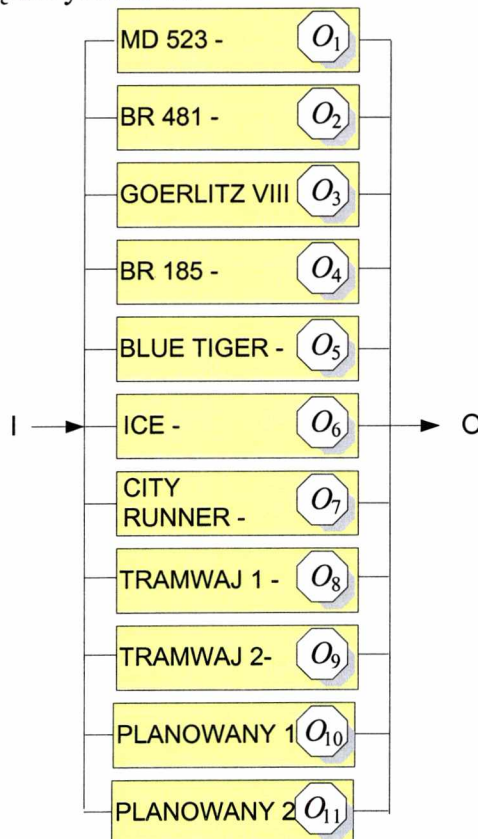
ETAP 4. Wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu

Warunkiem poprawnego funkcjonowania systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego jest poprawne funkcjonowanie wszystkich jego obszarów. Jeśli w jednym z obszarów pojawią się zakłócenia, uniemożliwiające wykonanie tego etapu, to cały system ulegnie uszkodzeniu. W związku z tym ustalono, że system produkcyjny wyrobu reprezentacyjnego będzie miał szeregową strukturę niezawodnościową, przedstawioną na rysunku 69



Rys. 69. Szeregową strukturą niezawodnościową systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego

Do funkcjonowania systemu produkcyjnego całego zakładu nie jest konieczne funkcjonowanie wszystkich jego obszarów. Nie można jednak poprawnego funkcjonowania jednego obszaru uznać za poprawne funkcjonowanie całego systemu. Ryzyko zawadności jednego z obszarów powinno przekładać się na wzrost ryzyka zawadności całego systemu, dokładnie o wartość ryzyka w tym obszarze. Dlatego ustalono, że struktura niezawadnościowa całego zakładu będzie produkcyjną strukturą równoległą przedstawioną na rysunku 70.



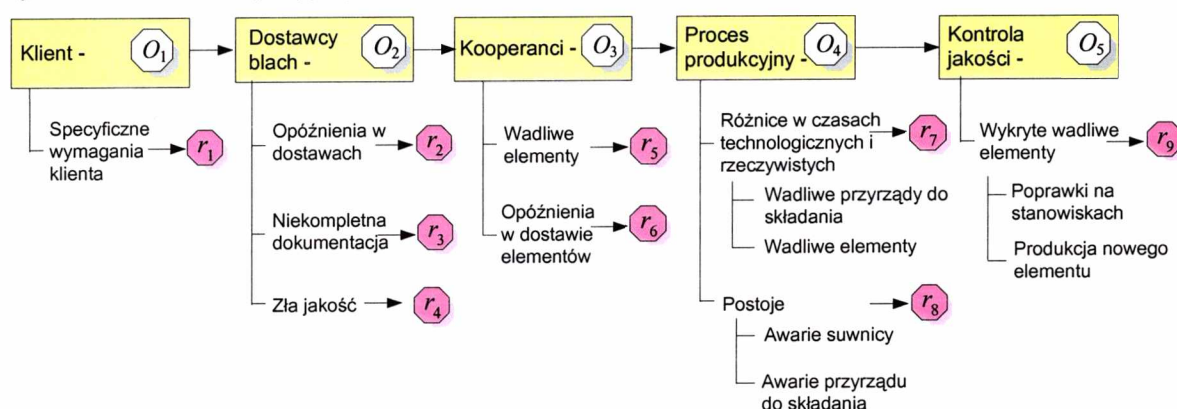
Rys. 70. Produkcyjną strukturą równoległą systemu produkcyjnego całego zakładu

ETAP 5. Wyodrębnienie czynników ryzyka w poszczególnych obszarach

Ponieważ w części [1] i [2] projektowano layout oraz przeprowadzono optymalizację systemu produkcyjnego, wszystkie czynniki organizacyjne, powodujące zakłócenia w systemie, zostały na tym etapie już wyeliminowane. Czynniki ryzyka dla wyrobu reprezentatywnego wyodrębniono na podstawie obserwacji bezpośrednich, analizy dokumentacji zrealizowanych wcześniej zleceń oraz konsultacji i wywiadów z pracownikami następujących komórek organizacyjnych:

- sterowanie produkcją,
- planowanie procesów,
- zapewnienie jakości,
- magazynu,
- nadzoru spawalniczego,
- brygadzystą linii MD 523.

Na tej podstawie wyróżniono następujące czynniki ryzyka przedstawione na rysunku 71 wraz z przyjętymi oznaczeniami.



Rys. 71. Czynniki ryzyka wyodrębnione w poszczególnych obszarach procesu produkcyjnego ramy MD 523 oraz ich oznaczenia

Ponieważ wszystkie procesy produkcyjne przedsiębiorstwa przebiegają w sposób analogiczny w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, przyjęto, że w pozostałych procesach występują te same czynniki ryzyka. Wyznaczenie ryzyka dla całego zakładu odbędzie się przy pomocy współczynników przeliczeniowych, uwzględniających liczbę produkowanych wyrobów i dopiero po wyznaczeniu ryzyka dla wyrobu reprezentatywnego.

ETAP 6. Pomiar czynników ryzyka i wyznaczenie reprezentatywnego okresu analizy

W celu wyznaczenia wielkości, częstotliwości pojawiania się oraz podstawowych charakterystyk poszczególnych czynników ryzyka w okresie trzech miesięcy (styczeń – marzec 2003) przeprowadzono bezpośrednią obserwację i pomiar czasów

technologicznych procesu produkcyjnego. Ponieważ czynniki ryzyka mają charakter losowy, a okres przeprowadzanych obserwacji dostarczył reprezentatywnego zbioru danych, przyjęto ten okres za reprezentatywny dla wyznaczenia charakterystyk czynników ryzyka. Roczny fundusz czasu pracy dla zakładu wynosi 46 tygodni, dla $T=3 \text{ miesiące} = 12 \text{ tygodni}$, wartość teoretyczną celu (W_{teoret}), w rozbięciu na poszczególne projekty, przedstawiono w tabeli 33.

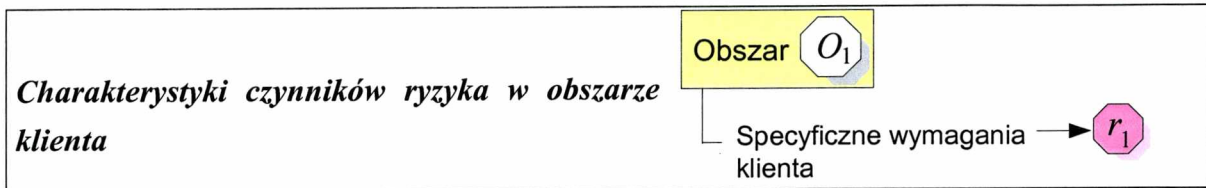
Tabela 33. Teoretyczne wartości celu dla okresu reprezentatywnego

NAZWY PROJEKTÓW	W_{teoret} / rok	W_{teoret} / T
Projekt BR 185	133	35
Projekt Blue Tiger	66	17
Projekt ICE	199	52
Projekt MD 523	530	138
Projekt Goerlitz VIII	398	104
Projekt BR 481	265	69
Projekt Cityrunner	133	35
Tramwaj 1	133	35
Tramwaj 2	133	35
Planowany 1	133	35
Planowany 2	133	35
Σ	2253	588

Dodatkowo analizie poddano dokumentację, przyjmując za okres analizy styczeń - marzec 2003. Oprócz dokumentacji uwzględnionej w [1] i [2] części projektu przeanalizowano:

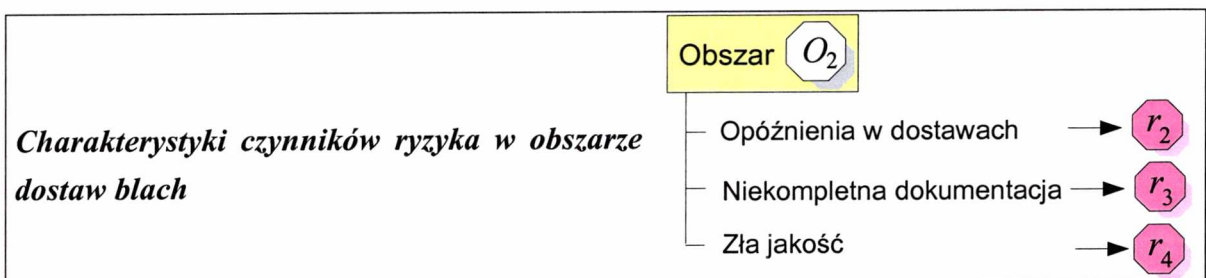
1. Główny harmonogram produkcji na okres styczeń - marzec 2003.
2. Szczegółowy plan produkcji, tydzień 14 do 16 2003 roku.
3. Zestawienie podzespołów do ramy wózka MD 523 i belki bujawkowej MD 523 z podziałem na poddostawców oraz ilościami na jednostkę i zlecenie.
4. Harmonogram wypalania elementów z podziałem na projekty.
5. Ewidencję postojów produkcji w miesiącach styczeń - marzec 2003.
6. Back Order – przyczyny godzin postojowych w miesiącach styczeń - marzec 2003.
7. Protokoły postojowe w miesiącach styczeń – marzec 2003.
8. Tygodniowe raporty wydajności z tygodni 5 – 12.
9. Karty kontroli spawalniczej ram MD 523: Iran nr 15 do 34, Arabia nr 63 do 76.
10. Zestawienie kart braków poddostawców za I kwartał 2003.
11. Karty braków zewnętrzne za okres styczeń – marzec 2003(NCR Zewnętrzne).
12. Protokoły reklamacyjne za okres styczeń – marzec 2003 (NCR Klientów).
13. Karty braków (NCR wewnętrzne),
14. Harmonogram dostaw blach za okres styczeń – marzec 2003.

Poniżej przedstawione zostaną charakterystyki czynników ryzyka, wyróżnionych w poszczególnych obszarach systemu produkcyjnego.



Specyficzne wymagania klienta oznaczają, że klient może żądać zmian konstrukcyjno – technologicznych w wyrobie. Główną przyczyną tego czynnika ryzyka są różnego rodzaju normy i przepisy odnośnie do bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Przepisy te są szczególnie rygorystyczne w Niemczech, a Koleje Niemieckie (DB) są jednym z najważniejszych klientów zakładu. Czynniki ten uznano za czynnik ryzyka, gdyż niemożliwe jest jego wyeliminowanie, przewidzenie zmian w wytwarzaniu, jakie zażąda klient oraz przewidzenie dla jakich klientów będą produkowane wyroby w kolejnych latach. W analizowanym okresie 30% produkcji stanowiły wyroby dla Kolei Niemieckich DB. Klient DB zażądał następujących zmian w operacjach technologicznych:

- dotaddkowego szlifowania spoin po operacjach spawania, co powoduje wydłużenie czasu trwania procesu produkcyjnego o 8 godzin dla 1 sztuki wyrobu,
- specjalnego odbioru końcowego ram przez komisara DB, co powoduje wydłużenie czasu trwania procesu produkcyjnego o 1 godzinę dla 1 sztuki wyrobu.



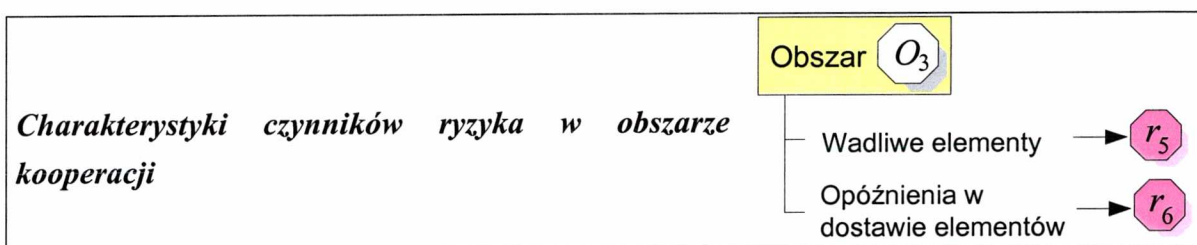
Rynek blach jest od dwóch lat bardzo niestabilny i w analizowanym okresie zakład nie prowadził ewidencji czasu jaki upłynął pomiędzy wysłaniem zamówienia na blachy a jego dostarczeniem. W związku z tym zdecydowano potraktować czynniki r_2 , r_3 i r_4 zbiorczo, a charakterystyki dla nich wyznaczyć na podstawie okresu kontroli, który standardowo powinien trwać trzy dni. W analizie natomiast uwzględniono rzeczywistą ilość i terminy dostaw. W rozpatrywanym okresie dla projektu MD 523 było 18 dostaw od czterech producentów blach.

Ponieważ opóźnienia dostaw blach są losowe, dla zdefiniowanego czasu kontroli wyznaczono dla poszczególnych dostawców czasy średnie i odchylenia standardowe.

Realizacja dostaw będzie odbywać się według rozkładu normalnego o następujących charakterystykach przedstawionych w tabeli 34.

Tabela 34. Zestawienie danych na temat dostaw blach w rozpatrywanym okresie

Nazwa dostawcy	Ilość dostaw	Średnia czasu kontroli [dni]	Odchylenie standardowe	Średni okres kolejnych dostaw	Odchylenie standardowe
SSM	8	11,2	4,14	5,82	4,84
H. Andrzej	2	7,5	0,71	1	0
H. Częstochowa	2	5,5	0,71	3	0
H. Pokój	6	6,9	1,46	5,57	7,04



Wadliwe elementy przychodzące z kooperacji (czynnik r_5) zazwyczaj wykrywane są podczas kontroli jakości w magazynie. Informacje na ten temat, wraz ze sposobem postępowania z takim elementem, odnotowywane są w kartach braków zewnętrznych lub na protokołach reklamacyjnych. W analizowanym okresie dla elementów do produkcji ramy MD 523 wystawiono 8 kart braków zewnętrznych i dwa protokoły reklamacyjne. Zebrane dane z tych dokumentów przedstawia tabela 35.

Tabela 35. Zestawienie danych na temat wadliwych elementów z kooperacji w okresie T

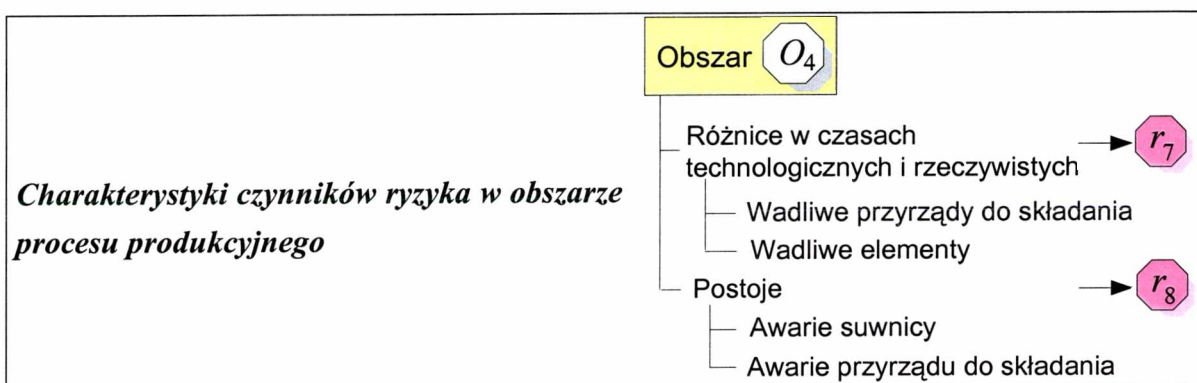
Nazwa Poddostawcy	Struktura nadrzędna	Nr elementu	Nazwa elementu	Ilość braków w analizowanym okresie	Sposób postępowania z brakiem
Ankor	belka	0108771-04.0903-4P2	Korpus belki bujakowej	4	Nowe zlec. Produkcyjne
ZBM i UD Zabrze	belka	0108771-04.0903-4P2	Korpus belki bujakowej	2	Nowe zlec. Produkcyjne
Cepa	podłużnica - rama	0106362-04.0903-1	Pas dolny	29	złomowanie

Z powodu opóźnień w dostawach elementów (czynnik r_6) na liniach produkcyjnych zdarzają się przestoje. Informacja na ich temat odnotowywana jest na kartach postojowych. W rozpatrywanym okresie zanotowano 18 przestojów dla belki bujakowej. Wszystkie karty postojowe jako przyczynę postoju miały podane brak odlewu korpusu belki bujakowej oraz brak belek bujakowych. Dostawą elementów do belek bujakowych, jak również ich obróbką, zajmują się poddostawcy Ankor i Zabrze.

Sumaryczne zestawienie godzin postojowych, w zależności od przyczyn, zamieszczono w tabeli 36.

Tabela 36. Zestawienie postojów spowodowanych brakiem materiałów z kooperacji dla belki bujakowej

Ilość postojów	Łączny czas postoju w rozpatrywanym okresie [godz.]	Przyczyna postoju
13	97	Brak materiału na korpus
5	25	brak belek po obróbce mechanicznej



Głównym czynnikiem ryzyka w obszarze procesu produkcyjnego są różnice między czasami technologicznymi, a rzeczywistymi (czynnik r_7). Przyczyną tych rozbieżności są wadliwe przyrządy do składania oraz wadliwe elementy (nie wykryte podczas kontroli jakości w magazynie). Powodują one znaczne różnice między czasami technologicznymi, a czasami rzeczywistymi. Dodatkowo istnieje konieczność wykańczania elementów. Na podstawie dokumentacji technologicznej procesu produkcyjnego, obserwacji linii produkcyjnej i pomiarów czasów sporządzono zestawienie różnic między czasami technologicznymi a czasami rzeczywistymi, przedstawione w tabeli 37.

Tabela 37. Zestawienie różnic między czasami technologicznymi a rzeczywistymi

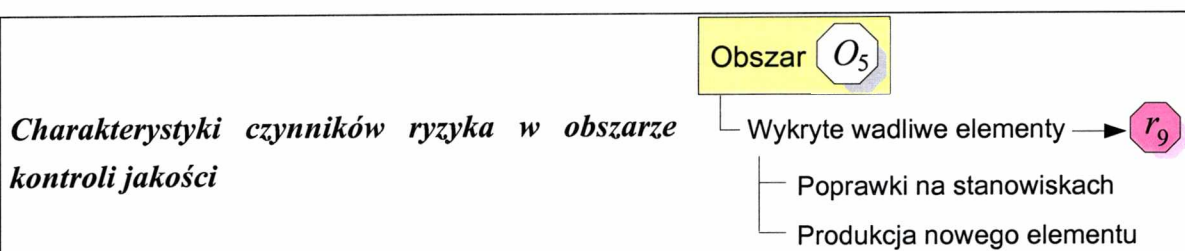
Stanowisko	Nr operacji	Czas technologiczny [min]	Średni czas rzeczywisty [min]	Różnica czasów [min]
Rama				
1. Belka Poprzeczna	od 10 do 50	122	142	20
2. Podłużnica 1 op.	od 10 do 20	60	160	100
3. Spawanie podłużnicy	30	90	150	60
2. Podłużnica 1 op.	od 40 do 50	20	45	25
3. Spawanie podłużnicy	60	90	90	
4. Podłużnica 2 op.	od 70 do 80	40	40	
3. Spawanie podłużnicy	90	30	30	
4. Podłużnica 2 op.	od 100 do 110	47	47	
3. Spawanie podłużnicy	120	120	120	

4. Podłużnica 2 op.	od 121 do 122	30	50	20
3. Spawanie podłużnicy	123	15	15	
5. Płyta	130	50	0	
6. Montaż ramy	od 10 do 20	160	160	
7. Spawanie ramy	30	360	360	
5. Płyta	od 40 do 50	265	0	
7. Spawanie ramy	60	120	120	
5. Płyta	od 70 do 80	200	0	
Wykańczanie	nie uwzględniono w technologii		480	480
Belka bujakowa				
1a. Szczerpanie do spawania	od 10 do 20	71	71	
2a. Spawanie łukiem krytym	30	210	480	270
Stanowisko S	do 50 do 60	58	58	
3a. Belka bujakowa 1 op.	od 10 do 93	453	634,2	181
4a. Belka bujakowa 2 op.	od 94 do 96	155	155	
5a. Belka bujakowa 3 op.	od 100 do 102	40	44	4
6a. Spawanie belki	104	20	20	
Stanowisko T	od 106 do 108	60	60	

Innym czynnikiem ryzyka w obszarze procesu produkcyjnego są postoje spowodowane awariami suwnicy i awariami przyrządów do składania. Czasy oraz daty postojów odnotowywane są na dokumentach Back Order oraz protokołach postojowych. Zestawienie postojów i ich przyczyn w analizowanym okresie przedstawia tabela 38.

Tabela 38. Zestawienie postojów oraz ich przyczyn

Liczba postojów	Łączny czas postoju w rozpatrywanym okresie [godz.]	Przyczyna postoju
6	22,5	Awaria suwnicy
8	17,5	Awaria przyrządu do składnia



Czynnikiem ryzyka w obszarze kontroli jakości (r_9) są wykryte wadliwe elementy, które są naprawiane lub złomowane. Czynności te wpływają na wydajność procesu poprzez wydłużenie czasu produkcji, gdyż naprawa odbywa się na stanowisku, na którym powstał błąd, złomowanie elementu pociąga natomiast konieczność wyprodukowania nowego. Analiza procesu produkcyjnego wykazała, że dla 7% produkowanych elementów istnieje konieczność naprawy, natomiast 3% elementów jest

złomowanych. Czas poprawek waha się od 10 min. do rzeczywistego czasu trwania operacji. Ponieważ czas ten nie jest stały, to w analizie przyjęto, że ma rozkład normalny. Tabela 39 zawiera zestawienie czasów korekt dla poszczególnych operacji.

Tabela 39. Zestawienie czasów korekt dla poszczególnych operacji

Stanowisko	Nr operacji	Średni czas rzeczywisty [min.]	Średni czas korekty [min.]	Odchylenie standardowe [min.]
Rama				
1. Belka Poprzeczna	od 10 do 50	142	66	93,34
2. Podłużnica 1 op.	od 10 do 20	160	75	106,07
3. Spawanie podłużnicy	30	150	70	98,99
2. Podłużnica 1 op.	od 40 do 50	45	17,5	24,75
3. Spawanie podłużnicy	60	90	40	56,57
4. Podłużnica 2 op.	od 70 do 80	40	15	21,21
3. Spawanie podłużnicy	90	30	10	14,14
3. Spawanie podłużnicy	120	120	55	77,78
4. Podłużnica 2 op.	od 121 do 122	50	20	28,28
3. Spawanie podłużnicy	123	15	2,5	3,54
5. Płyta	130	0	20	7,07
6. Montaż ramy	od 10 do 20	160	75	106,07
7. Spawanie ramy	30	360	175	247,49
5. Płyta	od 40 do 50	0	127,5	7,07
7. Spawanie ramy	60	120	55	77,78
5. Płyta	od 70 do 80	0	95	7,07
Belka bujakowa				
2a. Spawanie łukiem krytym	30	480	235	332,34
Stanowisko S	do 50 do 60	58	24	33,94
3a. Belka bujakowa 1 op.	od 10 do 93	634,2	312,1	441,38
4a. Belka bujakowa 2 op.	od 94 do 96	155	72,5	102,53
6a. Spawanie belki	104	20	5	7,07
Stanowisko T	od 106 do 108	60	25	35,36

ETAP 7. Budowa modeli systemu produkcyjnego

Z uwagi na szybkość obliczeń, łatwość wprowadzania zmian oraz możliwość przeprowadzenia analizy wariantowej wpływu poszczególnych czynników ryzyka na system produkcyjny, zdecydowano się na budowę modeli symulacyjnych. Część [1] i [2] projektu została wykonana w pakiecie symulacyjnym ProModel 2002. Program ten dobrze nadaje się do rozwiązywania zagadnień logistycznych oraz projektowania layout'ów i ich optymalizacji ze względu na wybrane kryteria [5, 44]. Jednak część [3] projektu miała inną specyfikę w związku z innym celem prowadzonej analizy. Zaakceptowane przez zarząd zakładu layout'y stanowiły dane wejściowe i nie były przedmiotem rozważań. Pojawiła się natomiast potrzeba uwzględnienia w modelach następujących zagadnień:

- podziału systemu produkcyjnego na etapy, dla których będzie prowadzona analiza,

- przypisanie obiektów do poszczególnych etapów procesu,
- uwzględnienie przynależności obiektów do struktury organizacyjnej,
- przeprowadzanie szczegółowej analizy dla różnych zmiennych w podprocesach,
- wprowadzenia zmiennych losowych oraz ich charakterystyk,
- przypisanie zmiennych losowych do obiektów.

W związku z powyższym postanowiono część [3] projektu wykonać w programie iGrafx for Six Sigma, pozwalającym na realizację wyznaczonych zadań [69].

W celu uzyskania wyników zbliżonych jak najbardziej do rzeczywistości, w modelach uwzględniono następujące dane rzeczywiste na temat czynników ryzyka:

- specyficzne wymagania klienta,
- ilość i terminy dostaw (tabela 34),
- ilość i rodzaj wadliwych elementów od kooperantów oraz sposób postępowania z brakami (tabela 35),
- ilość i czas postojów spowodowanych brakiem materiałów od kooperantów (tabela 36),
- ilość i czas postojów spowodowanych awariami (tabela 38).

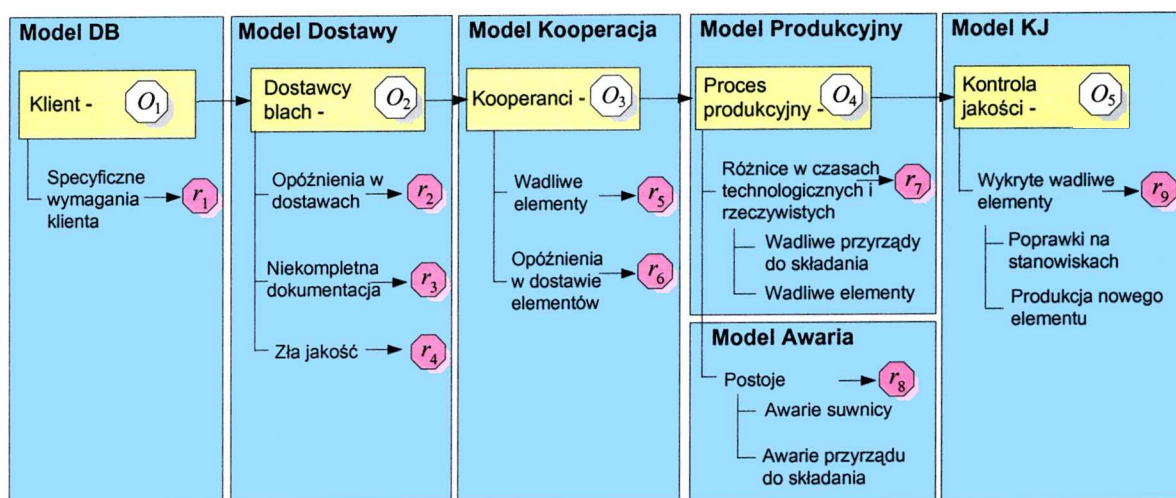
Dla pozostałych czynników ryzyka przyjęto rozkład normalny oraz dane przedstawione w etapie 6 metodyki.

Do wyznaczenia ryzyka **wyrobu reprezentatywnego** posłużyła symulacja wariantowa. Analizę rozpoczęto od budowy modelu bazowego, zawierającego wszystkie dane technologiczne, organizacyjne i logistyczne, jednak bez czynników ryzyka. Posłużył on za podstawę i punkt odniesienia do porównania wyników pochodzących z modeli z ryzykiem. Następnie zbudowano modele z czynnikami ryzyka dla każdego obszaru wyznaczonego w Etapie [3] metodyki. Ponieważ wyznaczone obszary są alogiczne do etapów procesu produkcyjnego, każdy kolejny model zbudowano poprzez wprowadzanie czynników ryzyka występujących w kolejnych obszarach. Jedynie dla obszaru O_4 (procesu produkcyjnego) postanowiono oddzielnie zanalizować wielkość wpływu różnic czasów technologicznych i rzeczywistych (czynnik r_7) na system produkcyjny oraz postojów spowodowanych awariami (czynnik r_8). W sumie zbudowano 7 następujących modeli symulacyjnych:

1. **Model bazowy** – uwzględniający wszystkie dane technologiczne, organizacyjne i logistyczne oraz wyniki uzyskane w [1] części projektu bez czynników ryzyka,
2. **Model DB** – analizujący wpływ specyficznych wymagań klienta (czynnik r_1) z obszaru O_1 na system produkcyjny,
3. **Model dostawy** – analizujący łączny wpływ opóźnień na system produkcyjny braków i niekompletnej dokumentacji (czynniki r_2, r_3, r_4) w obszarze dostaw blach (O_2),

4. **Model kooperacja** – analizujący łączny wpływ wadliwych elementów (czynnik r_5) oraz opóźnień w dostawie elementów (czynnik r_6) z obszaru kooperacji (O_3),
5. **Model produkcyjny** – analizujący wpływ różnic pomiędzy czasami technologicznymi, a rzeczywistymi (czynnik r_7) w obszarze produkcji (O_4) na system produkcyjny,
6. **Model awaria** – analizujący wpływ postojów spowodowanych awariami (czynnik r_8) w obszarze produkcji (O_4) na system produkcyjny,
7. **Model KJ** – analizujący wpływ poziomu jakości (czynnik r_9) na system produkcyjny.

Rysunek 72 przedstawia czynniki ryzyka z poszczególnych obszarów oraz nazwy modeli, które je analizują



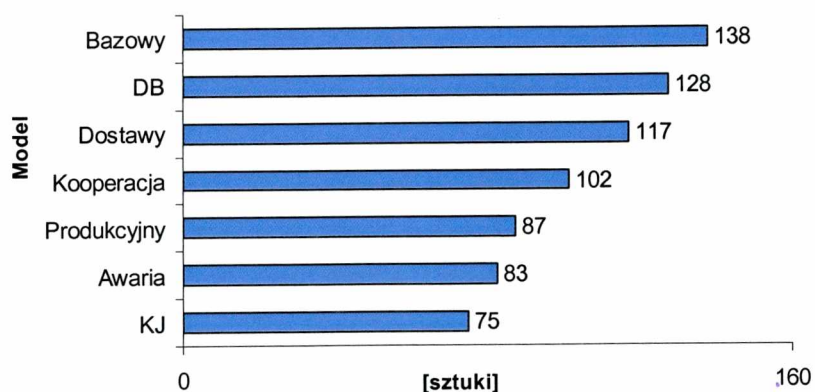
Rys. 72. Nazwy modeli analizujące poszczególne czynniki ryzyka

Dzięki przeprowadzonej symulacji uzyskano m.in. następujące wyniki produktywności i czasów symulacji przedstawione w tabeli 40.

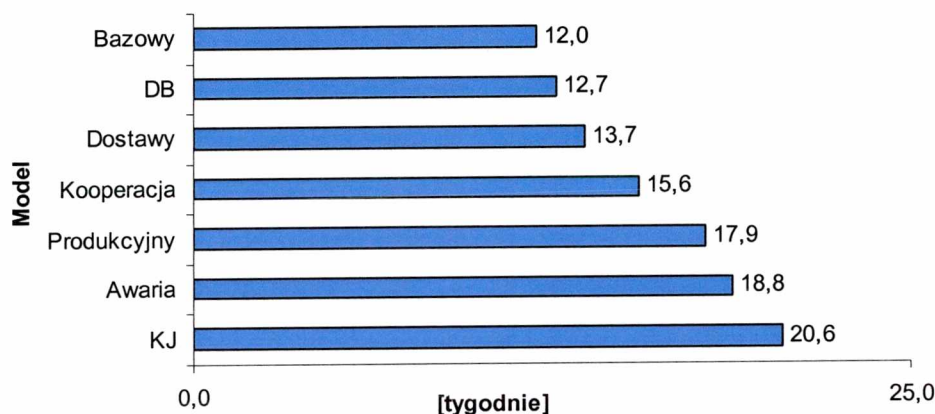
Tabela 40. Wyniki uzyskane z symulacji modeli dla założonego okresu T

Model	Produktywność w poszczególnych modelach dla 12 tygodni	Czas potrzebny na wyprodukowanie 138 sztuk wyrobu [tyg.]
Bazowy	138	12,0
DB	128	12,7
Dostawy	117	13,7
Kooperacja	102	15,6
Produkcyjny	87	17,9
Awaria	83	18,8
KJ	75	20,6

Przedstawione w tabeli 40 wyniki symulacji ilustrują rysunek 73 i rysunek 74.



Rys. 73. Produktywność w poszczególnych modelach w założonym okresie analizy T (12 tygodni)



Rys. 74. Czas potrzebny na wyprodukowanie 138 sztuk wyrobu

Uzyskane wyniki symulacji pokazują, że wraz z wprowadzaniem kolejnych czynników ryzyka do modeli spada produktywność oraz wydłuża się czas produkcji założonej liczby sztuk wyrobu. Na tej podstawie można stwierdzić, że zwiększa się prawdopodobieństwo nie osiągnięcia założonego celu systemu, czyli wyprodukowania 138 sztuk w analizowanym okresie T .

ETAP 8. Oszacowanie poziomu ryzyka dla wybranych struktur niezawodnościowych

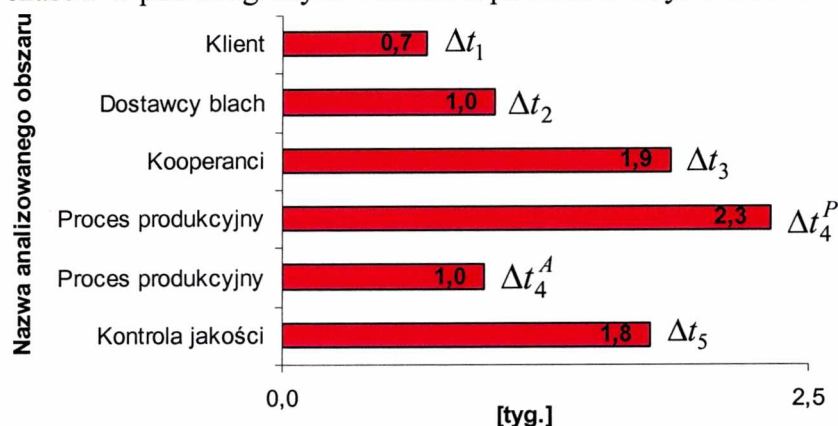
W Etapie [4] metodyki ustalono, że system produkcyjny **wyrobu reprezentatywnego** ma szeregową strukturę niezawodnościową o 5-ciu obszarach (rysunek 69). W celu wyznaczenia wielkości ryzyka całkowitego systemu (R_c) oraz wielkości ryzyka w poszczególnych obszarach należy zastosować **metodę wyznaczania ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej**. Tabela 41 przedstawia wyniki symulacji oraz oznaczenia wykorzystywane w dalszej części metody.

Tabela 41. Wyniki symulacji modeli oraz przyjęte w metodzie oznaczenia

Nazwa modelu	Nazwa analizowanego obszaru	Przyjęte oznaczenie dla obszaru	Oznaczenia występujących czynników ryzyka	Straty czasu w poszczególnych obszarach Δt_i [tyg.]
DB	Klient	O_1	r_1	$\Delta t_1 = 0,7$
Dostawy	Dostawcy blach	O_2	r_2, r_3, r_4	$\Delta t_2 = 1,0$
Kooperacja	Kooperanci	O_3	r_5, r_6	$\Delta t_3 = 1,9$
Produkcyjny	Proces produkcyjny	O_4	r_7	$\Delta t_4^P = 2,3$
Awaria	Proces produkcyjny	O_4	r_8	$\Delta t_4^A = 1,0$
KJ	Kontrola jakości	O_5	r_9	$\Delta t_5 = 1,8$

$\Delta t_4^P, \Delta t_4^A$ - zmiana czasu w obszarze 4 spowodowana czynnikami r_7 i r_8

Straty czasów w poszczególnych obszarach przedstawia rysunek 75.



Rys. 75. Straty czasu w poszczególnych modelach spowodowane występowaniem czynników ryzyka

Korzystając ze wzorów (5.5) do (5.7) metody analizy i oceny ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej można wyznaczyć straty w poszczególnych obszarach spowodowane występującymi w nich czynnikami ryzyka. Będą to:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} = 138 \frac{0,7}{12} = 8,05 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} = 138 \frac{1}{12} = 11,5 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

$$S_3 = W_{teoret} \frac{\Delta t_3}{T} = 138 \frac{1,9}{12} = 21,85 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

$$S_4^P = W_{teoret} \frac{\Delta t_4^P}{T} = 138 \frac{2,3}{12} = 26,45 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

$$S_4^A = W_{teoret} \frac{\Delta t_4^A}{T} = 138 \frac{1}{12} = 11,5 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

$$S_5 = W_{teoret} \frac{\Delta t_5}{T} = 138 \frac{1,8}{12} = 20,7 [\text{szt.}/12 \text{ tygodni}]$$

Znając wielkości strat można z kolei wyznaczyć wielkości ryzyka dla poszczególnych obszarów korzystając z wzorów (5.2) do (5.4):

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} = \frac{8,05}{138} = 0,06$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret} - S_1} = \frac{11,5}{138 - 8,05} = 0,09$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{teoret} - S_1 - S_2} = \frac{21,85}{138 - 8,05 - 11,5} = 0,18$$

$$R_4^P = \frac{S_4^P}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3} = \frac{26,45}{138 - 8,05 - 11,5 - 21,85} = 0,27$$

$$R_4^A = \frac{S_4^P}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4^P} = \frac{11,5}{138 - 8,05 - 11,5 - 21,85 - 22,99} = 0,16$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{teoret} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4^P - S_4^A} = \frac{20,7}{138 - 8,05 - 11,5 - 21,85 - 26,45 - 11,5} = 0,35$$

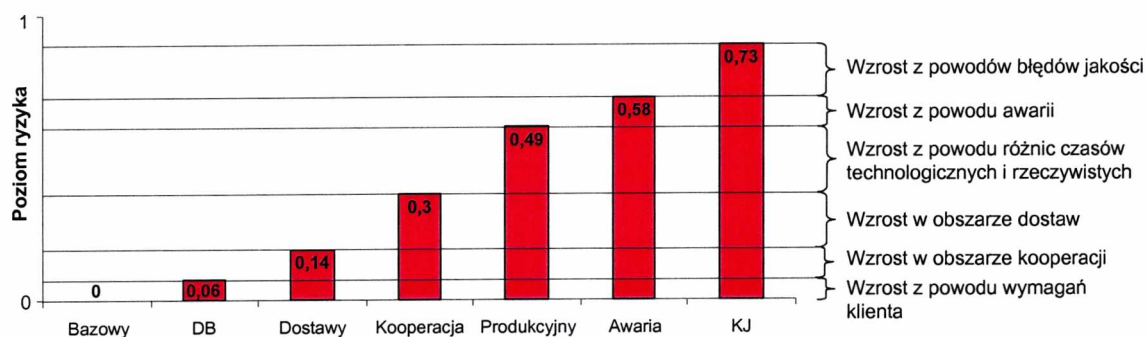
Ryzyko całkowite R_c dla systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego można wyznaczyć ze wzoru (5.1):

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4^P)(1 - R_4^A)(1 - R_5)] = 0,73$$

lub za pomocą wzoru (5.8)

$$R_c = 1 - [(1 - \frac{\Delta t_1}{T})(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1}) \dots (1 - \frac{\Delta t_5}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_5})] = 0,73$$

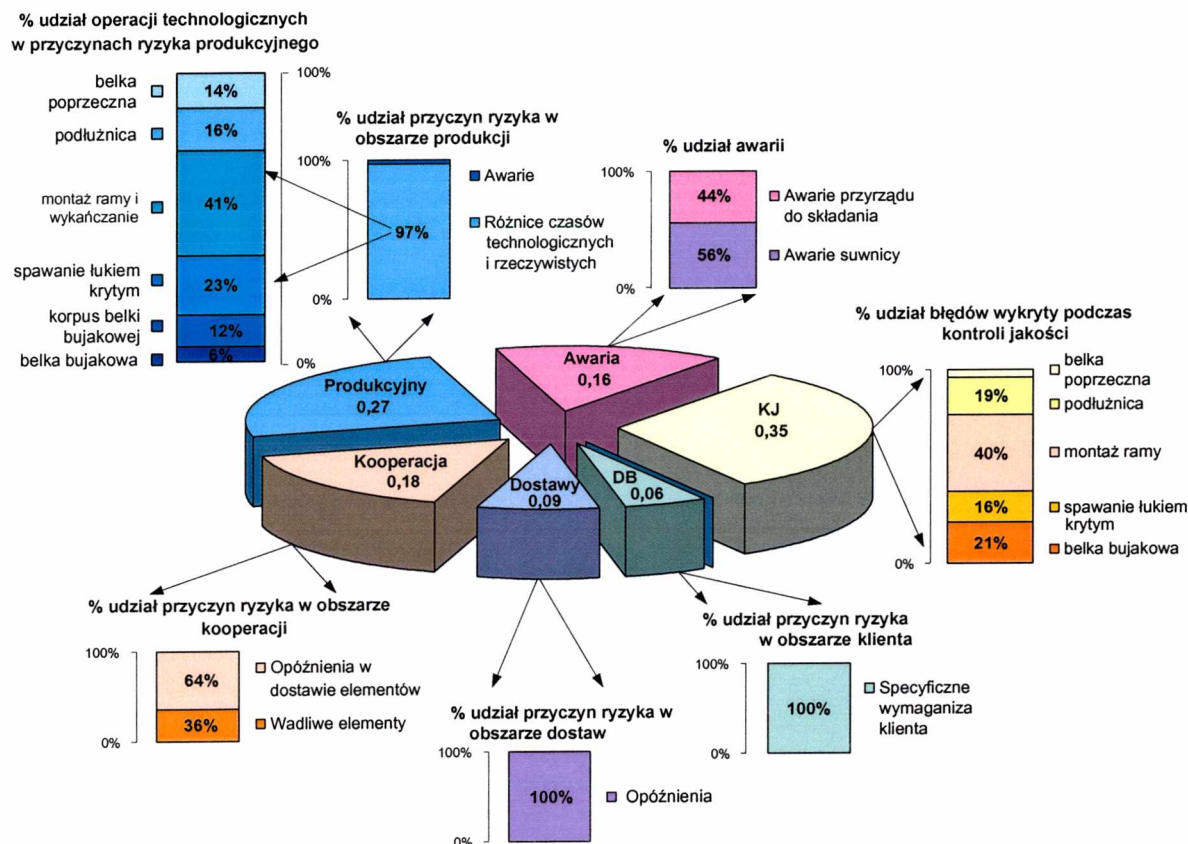
Otrzymana wartość ryzyka całkowitego R_c oznacza, że z prawdopodobieństwem 0,73 nie jest możliwa realizacja celu postawionego przed systemem, czyli produkcji 530 sztuk ram MD 523 rocznie. Rysunek 76 przedstawia przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych modelach. Ryzyko w modelu KJ odpowiada ryzyku całego systemu produkcyjnego wyrobu reprezentacyjnego, ponieważ zawiera wszystkie czynniki ryzyka.



Rys. 76. Poziomy ryzyka w poszczególnych modelach

Analiza przyrostów ryzyka w modelach wykazuje, iż największy przyrost ryzyka spowodowany jest czynnikami z obszaru produkcji, kooperacji i kontroli jakości. Chcąc obniżyć poziom ryzyka całkowitego (R_c), należałoby podjąć działania zmierzające do jego obniżenia głównie w tych trzech wymienionych obszarach.

Analizując wpływ czynników ryzyka na proces wytwórczy, można w poszczególnych obszarach wyznaczyć procentowy udział przyczyn zakłóceń w poszczególnych poziomach ryzyka oraz przedstawić strukturę jego czynników, co przedstawiono na rysunku 77.



Rys. 77. Procentowe udziały przyczyn zakłóceń w poziomach ryzyka w podziale na obszary systemu

Przy wyznaczaniu poziomu ryzyka całkowitego R_c całego zakładu posłużono się współczynnikami przeliczeniowymi, wynikami analizy ryzyka wyrobu reprezentatywnego oraz uwzględniono planowane do produkcji liczby sztuk. Za okres analizy T przyjęto 12 tygodni. Ponieważ, jak ustalono w Etapie [4] metodyki, struktura niezawodnościowa całego zakładu będzie produkcyjną strukturą równoległą, do obliczania ryzyka wykorzystano metodę dla systemów o produkcyjnej strukturze równoległej. Tabela 42 przedstawia dane potrzebne do wyznaczenia ryzyka całkowitego R_c całego zakładu.

Tabela 42. Dane potrzebne w metodzie

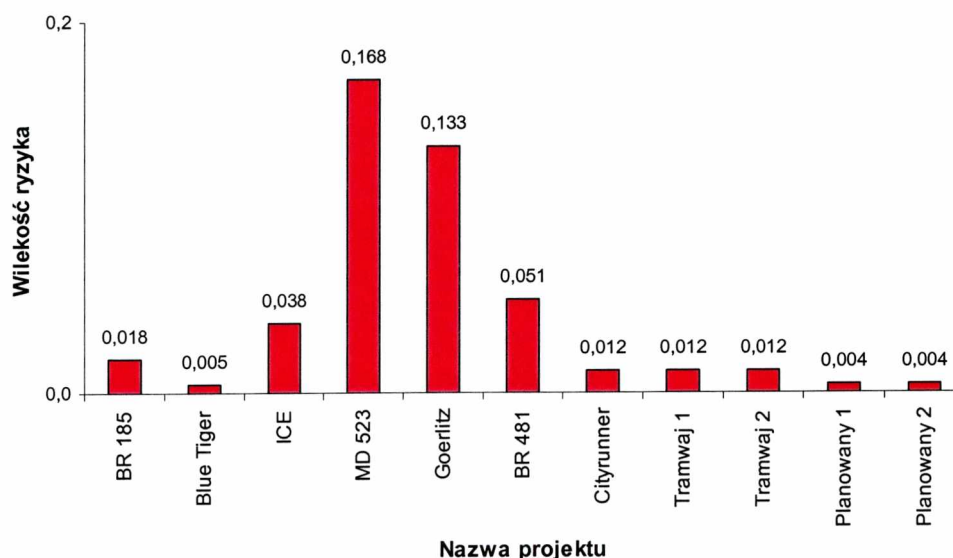
NAZWY PROJEKTÓW	R_i	Współcz. przelicz.	$W_{teoret}^i / 12 \text{ tygodni}$	Δt_i uwzględniająca współczynnik przeliczeniowy i planowane do produkcji liczby sztuk
Projekt BR 185	R_4	1,7	35	5,17
Projekt Blue Tiger	R_5	1,9	17	2,81
Projekt ICE	R_6	1,6	52	7,23
Projekt MD 523	R_1	1	138	12
Projekt Goerlitz VIII	R_3	1,4	104	12,66
Projekt BR 481	R_2	1,2	69	7,20
Projekt Cityrunner	R_7	1,1	35	3,35
Tramwaj 1	R_8	1,1	35	3,35
Tramwaj 2	R_9	1,1	35	3,35
Planowany 1	R_{10}	0,4	35	1,22
Planowany 2	R_{11}	0,4	35	1,22
Σ			588	

Korzystając ze wzorów (5.21) do (5.23) wyznaczono wielkości strat w poszczególnych obszarach, będących odpowiednikami wyrobów. Znając wielkości strat na podstawie wzorów (5.18) do (5.20) można wyznaczyć ryzyka dla wyróżnionych obszarów. Otrzymane w ten sposób wielkości strat i ryzyka zbiorczo przedstawia tabela 43.

Tabela 43. Wielkości strat oraz ryzyka dla poszczególnych wyrobów

Nazwy projektów	Oznaczenia obszarów	Straty [szt./12 tyg.]	Ryzyka
Projekt BR 185	O_4	10,61	0,018
Projekt Blue Tiger	O_5	2,92	0,005
Projekt ICE	O_6	22,35	0,038
Projekt MD 523	O_1	99,1	0,168
Projekt Goerlitz	O_3	78,23	0,133
Projekt BR 481	O_2	29,73	0,051
Projekt Cityrunner	O_7	6,86	0,012
Tramwaj 1	O_8	6,86	0,012
Tramwaj 2	O_9	6,86	0,012
Planowany 1	O_{10}	2,5	0,004
Planowany 2	O_{11}	2,5	0,004

Poziomy ryzyka dla poszczególnych wyrobów przedstawia rysunek 78.



Rys. 78. Wielkości ryzyk poszczególnych wyrobów

Jak wynika z tabeli 43 oraz rysunek 78, największe ryzyko występuje w procesie produkcji wyrobu MD 523 oraz Goerlitz VIII. Spowodowane jest to założoną ilością produkcji tych wyrobów – ich produkcja stanowi 41% zaplanowanej wielkości produkcji na lata 2004–2005. W kontekście całego zakładu ryzyko wyrobu reprezentatywnego zmienia się z 0,73 do 0,14. Spowodowane jest to zmianą wartości celu. Obecnie cel wyrobu reprezentatywnego rozpatrywany jest w kontekście części celu całego zakładu.

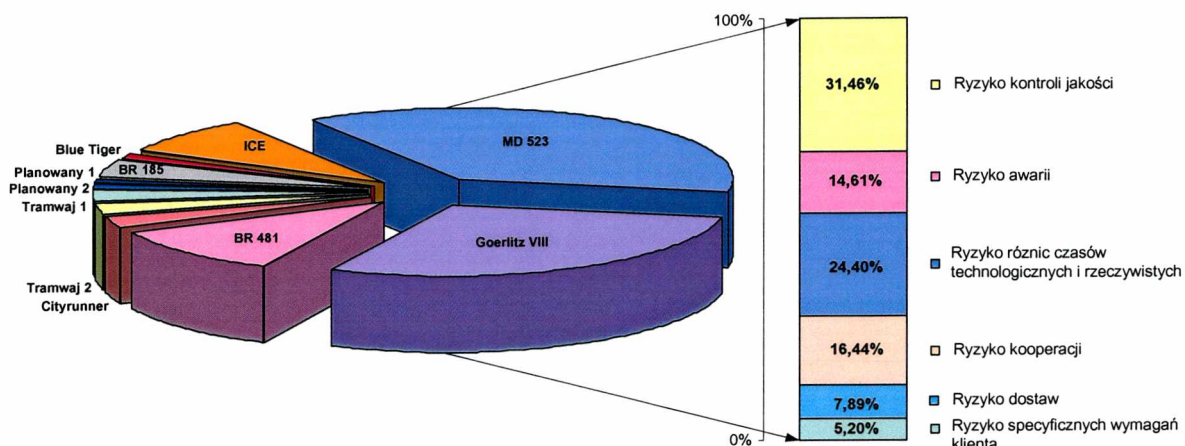
Przy obliczaniu ryzyka całkowitego dla całego zakładu R_c należy posłużyć się wzorem (5.17) lub (5.24). Wówczas ryzyko całkowite wynosi:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_{11} = \sum_{i=1}^n R_i = 0,46 \text{ lub}$$

$$R_c = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^{11} \Delta t_{11}}{W_{teoret} T} = 0,46$$

Poziom ryzyka zakładu w stosunku do ryzyka wyrobu reprezentatywnego obniżył się. Spowodowane jest to specyfiką struktury niezawodnościowej opisywanej w rozdziale 4 oraz wolnymi mocami produkcyjnymi na niektórych projektach, które powodują niwelację poziomu ryzyka.

Ponieważ procesy produkcyjne poszczególnych wyrobów są analogiczne w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, to również poziomy ryzyka poszczególnych obszarów (etapów) systemu produkcyjnego powinny być analogiczne. Rysunek 79 przedstawia ryzyka poszczególnych projektów oraz poziomy ryzyka dla obszarów systemu produkcyjnego.



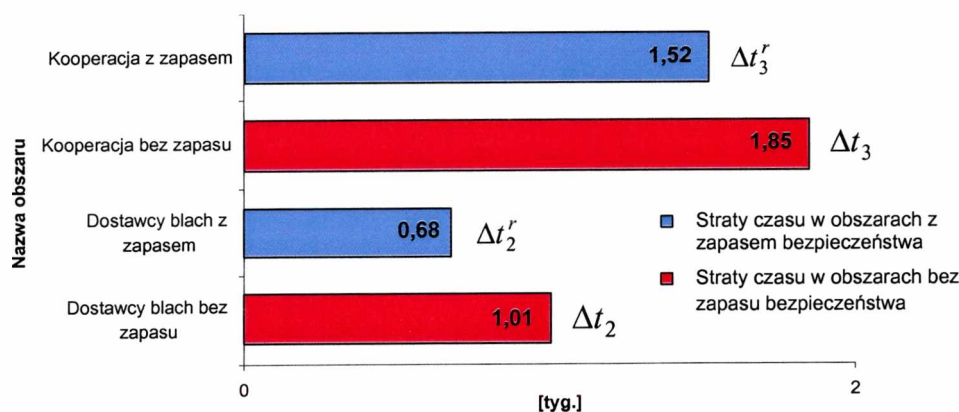
Rys. 79. Procentowy udział ryzyka w rozbiciu na obszary systemu produkcyjnego

Wyniki przedstawione na rysunku pokazują, iż tak jak w przypadku wyrobu reprezentatywnego, największe ryzyko występuje w obszarze kontroli jakości, produkcji oraz kooperacji.

Etap 9. Uwzględnienie wag w metodzie

Wykorzystanie współczynników wagowych w metodzie analizy ryzyka pozwala na określenie rzeczywistego poziomu ryzyka w systemie, niezależnie od poziomu organizacyjnego systemu produkcyjnego. Przytaczanym w pracy przykładem były zapasy magazynowe, zmniejszające wpływ opóźnień dostaw na ryzyko systemu produkcyjnego. W analizowanym zakładzie produkcyjnym zapasy nie występują, jednak dla celów metodyki, poniżej zostanie zanalizowany wpływ zapasów bezpieczeństwa na ryzyko systemu produkcyjnego.

Załóżmy, że analizowany zakład produkcyjny ma zapas bezpieczeństwa blach i podzespołów pozwalający na 3 dni produkcji. Dla wyrobu reprezentatywnego jest to 7 sztuk wyrobu. Wówczas zmiany czasów Δt_i dla obszaru dostaw blach i kooperacji będą przedstawiać się następująco:



Rys. 80. Różnice czasów wybranych obszarów bez i z zapasem bezpieczeństwa

Na rysunku 80 przedstawiono jedynie te obszary w których wprowadzono zmiany organizacyjne. W pozostałych obszarach Δt_i pozostają takie same jak na rysunku 75. Zmiany czasów w obszarach z zapasem bezpieczeństwa oznaczone przez Δt_2^r i Δt_3^r , oznaczają rzeczywisty czas wydłużenia procesu produkcyjnego. Czasy te są proporcjonalnie mniejsze, gdyż zapas bezpieczeństwa zmniejsza negatywny wpływ czynników ryzyka w tych obszarach.

Dysponując danymi z rysunku 80 i na podstawie wzoru (5.55) można wyznaczyć wartości współczynnika wagowego w obszarze dostaw blach (obszar O_2) i kooperacji (obszar O_3):

$$w_2 = \frac{\Delta t_2^r}{\Delta t_2} = 0,67$$

$$w_3 = \frac{\Delta t_3^r}{\Delta t_3} = 0,82$$

Podstawiając wartości obu wag do wzoru (5.56) na ryzyko całkowite R_c wyrobu reprezentatywnego otrzymujemy że:

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1\right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2\right) \dots \left(1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 w_1 - \dots - \Delta t_{n-1} w_{n-1}} w_n\right) \right] = 0,69$$

Z powyższych wyliczeń wynika, że wprowadzenie do systemu produkcyjnego zapasu bezpieczeństwa pozwalającego na 3 dniową produkcję zmniejsza poziom ryzyka wyrobu reprezentatywnego o 0,04.

Rozdział 8. Porównanie opracowanej metodyki planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych z wybraną metodą ilościową

Porównano metodykę planowania i oceny ryzyka z wybraną metodą zaprezentowaną w rozdziale 1. Do celów porównawczych wybrano metodę PERT, należącą do metod badań operacyjnych. W celu otrzymania wiarygodnych wyników, porównanie przeprowadzono na tym samym przykładzie praktycznym, na którym przeprowadzono, w rozdziale 7, weryfikację metodyki.

Celem tego rozdziału jest porównanie opracowanej w pracy metody planowania i oceny ryzyka z wybraną metodą ilościową opisaną w rozdziale 1. Aby porównanie było obiektywne, do jego przeprowadzenia posłużono się przykładem praktycznym, na którym przeprowadzono weryfikację opracowanej w pracy metodyki. Metody ilościowe analizy i oceny ryzyka procesu produkcyjnego, proponowane w literaturze, wymagają określonego zbioru danych wejściowych, a ich ograniczone możliwości wymuszają niejednokrotnie dostosowywanie analizowanego przykładu do możliwości metody. Ponieważ założono, że porównanie metody ilościowej z metodą zaproponowaną w niniejszej pracy przeprowadzone zostanie dla tego samego przykładu i na tym samym zbiorze danych, to do porównania wybrano metodę należącą do grupy metod badań operacyjnych programowania sieciowego – metodę PERT. Metoda PERT najbardziej odzwierciedla analizowane zadanie praktyczne, gdyż umożliwia wyznaczenie czasu wykonania projektu oraz odchyleń czasowych, mogących przesunąć jego realizację.

Aby przy pomocy metody PERT wyznaczyć ryzyko nie wyprodukowania w założonym terminie ramy wózka MD 523, potrzebne są trzy charakterystyki czasowe operacji technologicznych: czas optymistyczny, czas pesymistyczny i czas modalny. Przyjęte zostały następujące wielkości czasów:

- Czas optymistyczny $[a]$ - jest czasem normowanym, zgodnym z planowanym czasem wykonania operacji zgodnie z technologią. Czas ten jest możliwy do osiągnięcia tylko w najbardziej sprzyjających warunkach.
- Czas pesymistyczny $[b]$ – czas trwania operacji w najmniej sprzyjających warunkach. W przykładzie za czas pesymistyczny przyjęto czas optymistyczny (technologiczny) powiększony o różnicę czasów technologicznych i rzeczywistych oraz o średni czas korekty (porównaj tabela 37 i tabela 39). Ponieważ prawdopodobieństwo powstania braku naprawialnego wynosi 7%, natomiast złomowanego 3%, czas pesymistyczny operacji które są poprawiane jest powiększony o czas naprawy w proporcjach równych prawdopodobieństwu wyprodukowania braku w tych operacjach.

- Czas modalny $[m]$ – jest wartością środkową (medianą) przedziału pomiędzy czasem optymistycznym, a czasem pesymistycznym.

Na podstawie tych trzech czasów obliczono czas oczekiwany (t_e) zgodnie ze wzorem (1.23):

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6}$$

oraz wariancję czasu oczekiwanego, określającą odchylenie rzeczywiste czasu trwania czynności od wyznaczonego czasu oczekiwanego, zgodnie ze wzorem (1.24):

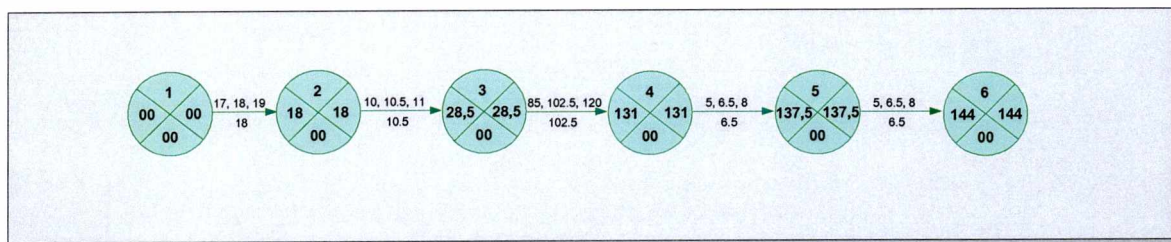
$$\sigma_{i-j}^2 = \left(\frac{b-a}{6} \right)^2$$

W tabelach 44 - 49 zamieszczone zostały wartości liczbowe czasów. Ponieważ metoda PERT analizuje czasy trwania operacji, to również przykład praktyczny dla tej metody zostanie przeprowadzony z podziałem na operacje technologiczne, a nie jak w rozdziale 6 na stanowiska.

Tabela 44. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji belki poprzecznej ramy wózka MD 523

Czynności i-j	Nr operacji	Czas optymistyczny [min.]	Czas modalny [min.]	Czas pesymistyczny [min.]	Czas oczekiwany [min.]	Wariancja
10-20	10	17	18,0	19	18,0	0,1
20-30	20	10	10,5	11	10,5	0,0
30-40	30	85	102,5	120	102,5	34,0
40-50	40	5	6,5	8	6,5	0,3
50-60	50	5	6,5	8	6,5	0,3
SUMA		122	144,0	166	144,0	34,7
Termin realizacji			144,0	Odchylenie od terminu 5,9		

Rysunek 81 przedstawia sieć czynności dla procesu produkcji belki poprzecznej analizowanego wyrobu.

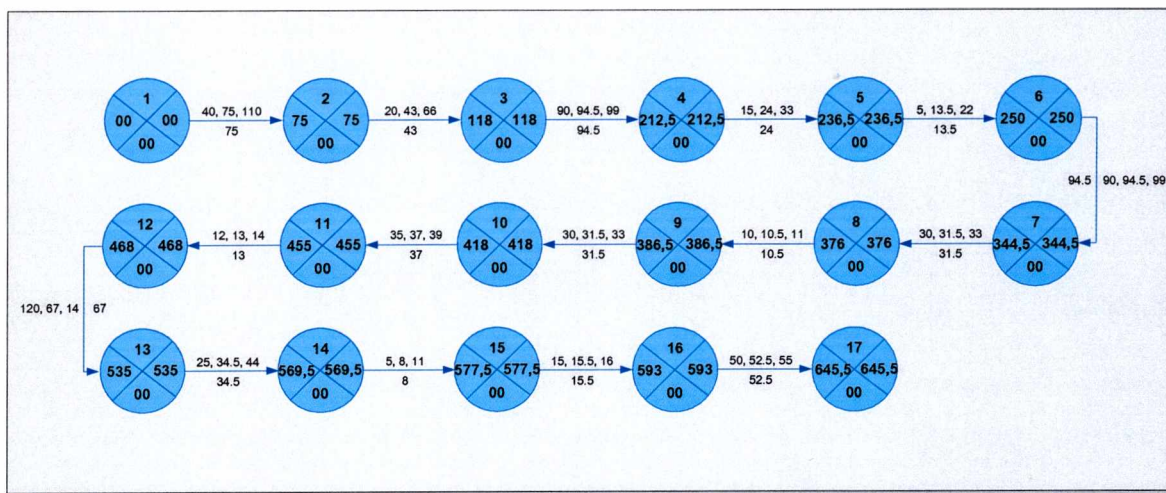


Rys. 81. Sieć czynności dla procesu produkcji belki poprzecznej ramy wózka MD 523

Tabela 45. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji podłużnicy ramy wózka MD 523

Czynności i-j	Nr operacji	Czas optymistyczny [min.]	Czas modalny [min]	Czas pesymistyczny [min.]	Czas oczekiwany [min.]	Wariancja
1-2	10	40	75,0	110	75,0	136,1
2-3	20	20	43,0	66	43,0	58,8
3-4	30	90	94,5	99	94,5	2,3
4-5	40	15	24,0	33	24,0	9,0
5-6	50	5	13,5	22	13,5	8,0
6-7	60	90	94,5	99	94,5	2,3
7-8	70	30	31,5	33	31,5	0,3
8-9	80	10	10,5	11	10,5	0,0
9-10	90	30	31,5	33	31,5	0,3
10-11	100	35	37,0	39	37,0	0,4
11-12	110	12	13,0	14	13,0	0,1
12-13	120	120	67,0	14	67,0	312,1
13-14	121	25	34,5	44	34,5	10,0
14-15	122	5	8,0	11	8,0	1,0
15-16	123	15	15,5	16	15,5	0,0
16-17	130	50	52,5	55	52,5	0,7
SUMA		592	645,5	699	645,5	541,4
Termin realizacji			645,5	Odchylenie od terminu		23,3

Rysunek 82 przedstawia sieć czynności dla procesu produkcji podłużnicy analizowanego wyrobu.

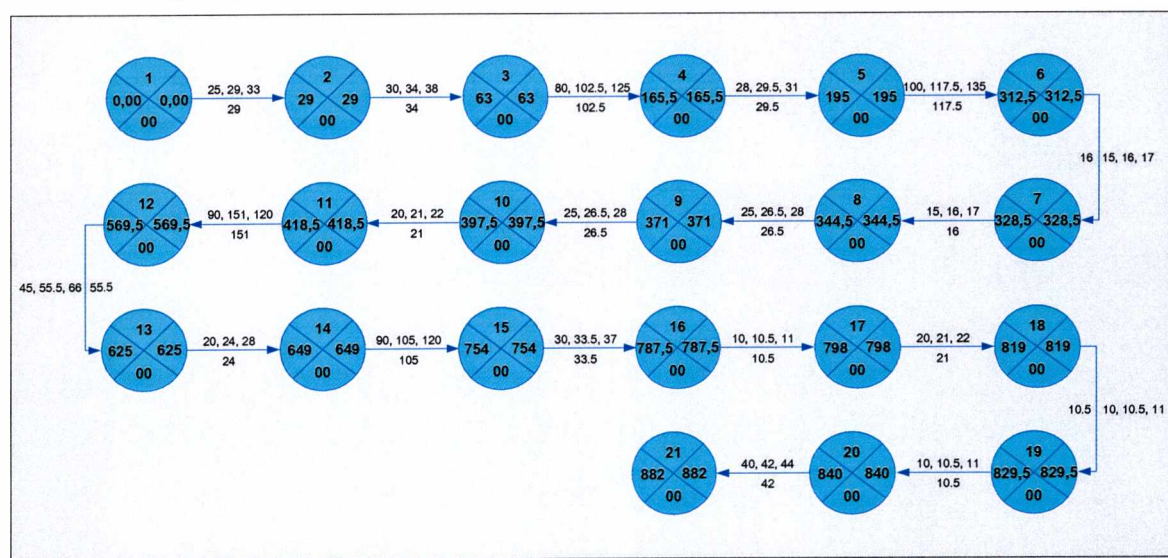


Rys. 82. Sieć czynności dla procesu produkcji podłużnicy ramy wózka MD 523

Tabela 46. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji belki bujakowej ramy wózka MD 523

Czynności i-j	Nr operacji	Czas optymistyczny [min.]	Czas modalny [min]	Czas pesymistyczny [min.]	Czas oczekiwany [min.]	Wariancja
1-2	10	25	29,0	33	29,0	1,8
2-3	20	30	34,0	38	34,0	1,8
3-4	30	80	102,5	125	102,5	56,3
4-5	40	28	29,5	31	29,5	0,3
5-6	50	100	117,5	135	117,5	34,0
6-7	55	15	16,0	17	16,0	0,1
7-8	60	15	16,0	17	16,0	0,1
8-9	80	25	26,5	28	26,5	0,3
9-10	91	25	26,5	28	26,5	0,3
10-11	92	20	21,0	22	21,0	0,1
11-12	93	90	151,0	120	135,7	25,0
12-13	94	45	55,5	66	55,5	12,3
13-14	95	20	24,0	28	24,0	1,8
14-15	96	90	105,0	120	105,0	25,0
15-16	100	30	33,5	37	33,5	1,4
16-17	102	10	10,5	11	10,5	0,0
17-18	104	20	21,0	22	21,0	0,1
18-19	106	10	10,5	11	10,5	0,0
19-20	107	10	10,5	11	10,5	0,0
20-21	108	40	42,0	44	42,0	0,4
SUMA		728	882,0	944	866,7	160,9
Termin realizacji			866,7	Odchylenie od terminu		12,7

Rysunek 83 przedstawia sieć czynności dla procesu produkcji belki bujakowej analizowanego wyrobu.

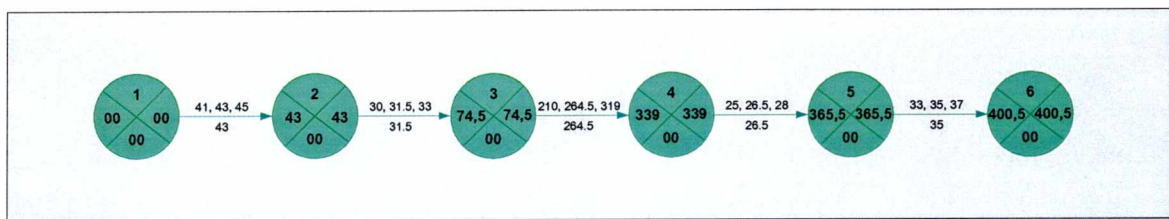


Rys. 83. Sieć czynności dla procesu produkcji belki bujakowej ramy wózka MD 523

Tabela 47. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji korpusu belki bujakowej ramy wózka MD 523

Czynności i-j	Nr operacji	Czas optymistyczny [min.]	Czas modalny [min]	Czas pesymistyczny [min.]	Czas oczekiwany [min.]	Wariancja
1-2	10	41	43,0	45	43,0	0,4
2-3	20	30	31,5	33	31,5	0,3
3-4	30	210	264,5	319	264,5	330,0
4-5	50	25	26,5	28	26,5	0,3
5-6	60	33	35,0	37	35,0	0,4
SUMA		339	400,5	462	400,5	331,4
Termin realizacji 400,5				Odchylenie od terminu 18,2		

Rysunek 84 przedstawia sieć czynności dla procesu produkcji korpusu belki bujakowej analizowanego wyrobu.

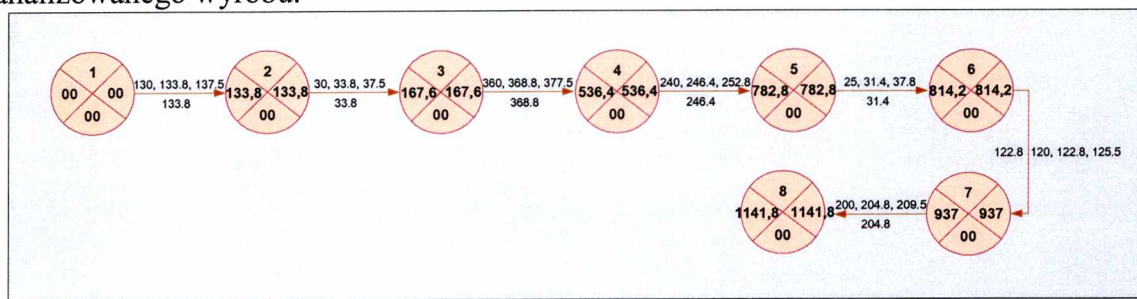


Rys. 84. Sieć czynności dla procesu produkcji korpusu belki bujakowej ramy wózka MD 523

Tabela 48. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji ramy wózka MD 52

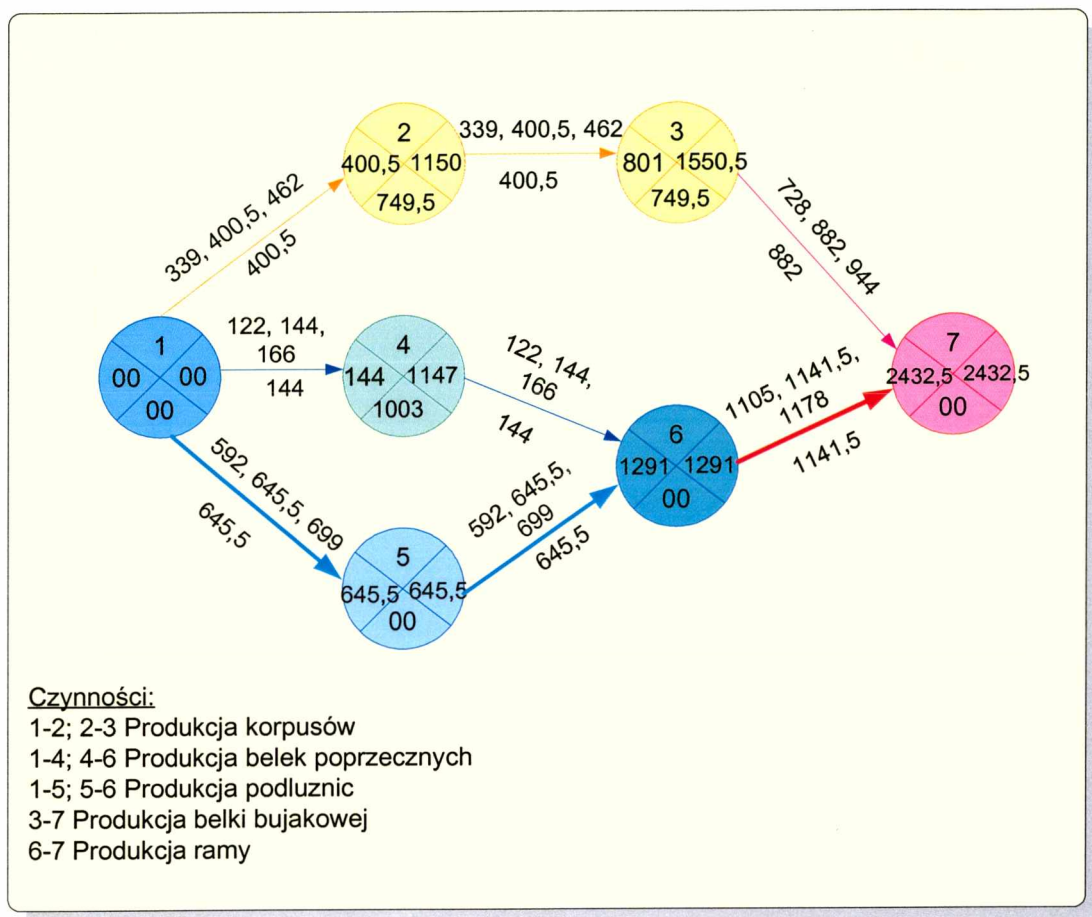
Czynności i-j	Nr operacji	Czas optymistyczny [min.]	Czas modalny [min]	Czas pesymistyczny [min.]	Czas oczekiwany [min.]	Wariancja
1-2	10	130	133,8	137,5	133,8	1,6
2-3	20	30	33,8	37,5	33,8	1,6
3-4	30	360	368,8	377,5	368,8	8,5
4-5	40	240	246,4	252,75	246,4	4,5
5-6	50	25	31,4	37,75	31,4	4,5
6-7	60	120	122,8	125,5	122,8	0,8
7-8	70	200	204,8	209,5	204,8	2,5
SUMA		1105	1141,5	1178	1141,5	24,0
Termin realizacji			1141,5	Odchylenie od terminu		4,9

Rysunek 85 przedstawia sieć czynności dla procesu produkcji ramy wózka analizowanego wyrobu.



Rys. 85. Sieć czynności dla procesu produkcji ramy wózka MD 523

Na podstawie analizy diagramów poszczególnych części składowych wózka można skonstruować model PERT dla całego wyrobu. Na rysunku 86 zamieszczony jest diagram skonstruowany w oparciu o proces produkcyjny ramy wózka MD 523. Łuki diagramu oznaczają czynności związane z wyprodukowaniem części składowych wózka (całe procesy produkcyjne). Węzły reprezentują ich początek i koniec.



Rys. 86. Diagram PERT procesu produkcyjnego ramy wózka MD 523

W tabeli 49 przedstawiono charakterystyki czasowe dla procesu produkcyjnego ramy wózka MD 523.

Tabela 49 Charakterystyki czasowe dla procesu produkcyjnego ramy MD 523

Czynności i-j	Proces produkcyjny	Czas optymistyczny [min]	Czas modalny [min]	Czas pesymistyczny [min]	Czas oczekiwany [min]	Wariancje czynności [min]
		a	m	b	t_e	σ^2
1-2	Korpus belki bujakowej	339,00	400,50	462,00	400,50	18,20
2-3	Korpus belki bujakowej	339,00	400,50	462,00	400,50	18,20
1-4	Belka poprzeczna	122,00	144,00	166,00	144,00	5,90

6-6	Belka poprzeczna	122,00	144,00	166,00	144,00	5,90
1-5	Podłużnica	592,00	645,50	699,00	645,50	23,30
5-6	Podłużnica	592,00	645,50	699,00	645,50	23,30
3-7	Belka bujakowa	728,00	882,00	944,00	882,00	12,70
6-7	Rama wózka	1105,00	1141,50	1178,00	1141,50	4,90
SUMA	(ścieżka krytyczna)	2289,00	2432,50	2576,00	2432,50	51,50
Termin realizacji			2432,50	Odchylenie od terminu		7,18

Dysponując danymi przedstawionymi w tabeli można wyznaczyć prawdopodobieństwo.

Ponieważ czas produkcji w analizowanym zakładzie obliczany jest jedynie na podstawie czasów technologicznych, to wymagany terminem t_d wykonania ramy będzie suma czasów technologicznych operacji, czas oczekiwany będzie terminem oczekiwanym wykonania przedsięwzięcia t_w . Korzystając ze wzoru (1.24) można obliczyć prawdopodobieństwo x zrealizowania produkcji w wyznaczonym czasie:

$$x = \frac{t_d - t_w}{\sqrt{\sigma_{TW}^2}} = \frac{2289 - 2432,5}{7,18} = -19,9$$

Dla tak obliczonego współczynnika x z tablic dystrybucyj rozkładu normalnego odczytuje się prawdopodobieństwo dotrzymania narzuconego z góry terminu, tzn:

$$P\{t_d \leq t_w\} = F(x) = 0$$

Ponieważ prawdopodobieństwo wynosi 0, nie jest możliwe wykonanie wyrobu w narzuconym z góry terminie.

Jak widać na zrealizowanym powyżej przykładzie, przy pomocy metody PERT można wyznaczyć prawdopodobieństwo wyprodukowania wyrobu w założonym terminie, czyli ryzyko analizowanego systemu produkcyjnego. Jednak metoda ta jest znacznie bardziej pracochłonna w porównaniu z zaproponowaną w pracy metodyką, a wprowadzenie jakiejkolwiek zmiany wymaga ponownych obliczeń dla całego procesu produkcyjnego.

W przeciwieństwie do metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych, metoda PERT nie daje również odpowiedzi na pytanie, jakie czynniki ryzyka i w jakim stopniu wpływają negatywnie na proces. Jediną odpowiedzią jest, czy możliwe jest wyprodukowanie wyrobu w założonym terminie czy nie.

Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Sformułowanie istoty ryzyka, charakterystycznego dla działalności gospodarczej, jest zagadnieniem złożonym. Widoczne jest to w mnogości podejść, definicji i klasyfikacji ryzyka przedstawionych w rozdziale pierwszym niniejszej pracy. Niestety, większość z nich, z uwagi na techniczny charakter procesu produkcyjnego, nie nadaje się do zastosowania w obszarze systemów wytwórczych. Ryzyko w obszarze procesów produkcyjnych objawia się w kontekście straty lub prawdopodobieństwa nieosiągnięcia założonych wskaźników charakterystycznych dla tego procesu. W obszarze finansów, podejmując większe ryzyko inwestor może spodziewać się również większych zysków z inwestycji.

Jeszcze bardziej skomplikowanie jest wyznaczenie wielkości ryzyka. Proponowane w literaturze metody ilościowe można zastosować do analizy i oceny ryzyka procesów produkcyjnych, lecz uzyskane wyniki są bardzo szacunkowe lub obarczone dużym błędem, co powoduje ich niewielką przydatność praktyczną. Przykłady zastosowania metod ilościowych do analizy i oceny ryzyka procesów produkcyjnych zaprezentowano w rozdziale 1 i w rozdziale 8. Ich niewielka przydatność praktyczna wynika z ograniczonych możliwości. Metody ilościowe proponowane przez literaturę odnoszą się do pojedynczych zagadnień, zakładają występowanie określonych czynników i warunków lub narzucają ograniczenia dla złożonej rzeczywistości procesów produkcyjnych.

Z drugiej jednak strony ryzyko stale towarzyszy każdej działalności gospodarczej, a sytuacja współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych wymusza podejmowanie szybkich decyzji odnośnie procesów wytwórczych. Aby zapewnić bezpieczne funkcjonowanie i rozwój przedsiębiorstwa, decydenci powinni mieć możliwość planowania i oceny ryzyka zarówno podczas podejmowanych decyzji produkcyjnych jak i w trakcie realizacji procesów wytwórczych.

Złożoność i dynamika systemów produkcyjnych oraz ich otoczenia wymaga od decydentów uwzględnienia i ciągłej analizy wielu danych i zmiennych. Dodatkowym utrudnieniem są losowo pojawiające się czynniki zakłócające, które stanowią stały element wszystkich systemów produkcyjnych. Aby było to możliwe niezbędne wydaje się zastosowanie narzędzi informatycznych, a w szczególności systemów symulacyjnych. Zalety symulacji oraz modelowania procesów produkcyjnych, opisane w rozdziale 3, spowodowały, że zaproponowana w niniejszej pracy metodyka wykorzystuje modele symulacyjne do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych.

Powyższa sytuacja spowodowała, że za cel główny pracy przyjęto „*opracowanie metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych oraz ilościowych współczynników wagowych, które umożliwią wyznaczenie rzeczywistej wielkości wpływu czynników ryzyka na system produkcyjny niezależnie od jego poziomu organizacji.*”

Aby analiza i ocena ryzyka była przydatna w praktyce, powinna proces produkcyjny traktować systemowo. Z tego powodu w pracy, w rozdziale 4, zaproponowano zdefiniowanie systemu produkcyjnego zgodnie z teorią systemów. Takie podejście umożliwiło zdefiniowanie struktury procesu produkcyjnego jako struktury niezawodnościowej oraz zastosowanie do wyznaczania ryzyka metod ogólnej teorii niezawodności. Dzięki temu opracowana metoda zyskała duże znaczenie praktyczne, gdyż, poprzez przypisanie czynników ryzyka do obszarów systemu produkcyjnego, można wyznaczać obszary o największym poziomie ryzyka. Daje to możliwość późniejszej jego eliminacji.

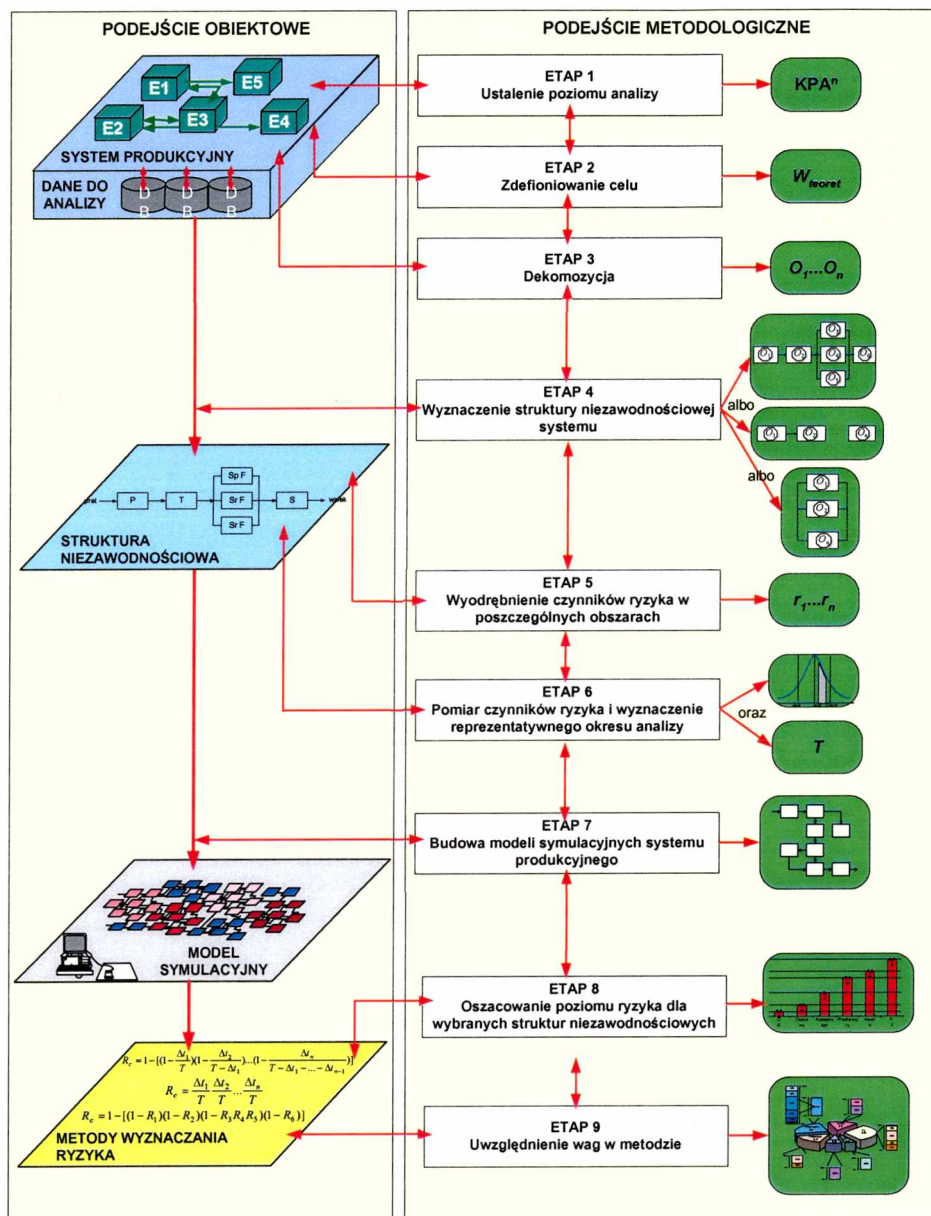
Za najważniejsze **osiągnięcia naukowe** niniejszej pracy uważa się:

- matematyczny opis statystycznych metod ilościowych poziomu operacyjnego,
- przedstawienie możliwości wykorzystania metod modelowania i symulacji w analizie ryzyka systemów produkcyjnych,
- zdefiniowanie struktur systemów produkcyjnych w kontekście struktur niezawodnościowych,
- opracowanie metod wyznaczania ryzyka procesu produkcyjnego dla poszczególnych struktur niezawodnościowych,
- zaproponowanie definicji produkcyjnej struktury równoległej,
- opracowanie etapowej metodyki modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych.

Za najważniejsze **osiągnięcia użytkowe** niniejszej pracy uważa się:

- opracowanie praktycznego sposobu postępowania przy wyznaczaniu poziomu ryzyka dla dowolnie dekomponowanych systemów produkcyjnych,
- opracowanie metod wyznaczania wielkości ryzyka dla całego systemu produkcyjnego i jego obszarów,
- opracowanie konstrukcji ilościowych współczynników wagowych, uniezależniających wyznaczony poziom ryzyka od poziomu organizacji procesu produkcyjnego.

Zaproponowane w pracy podejście do planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych, etapy metodyki oraz ich rezultaty przedstawia rysunek 87.



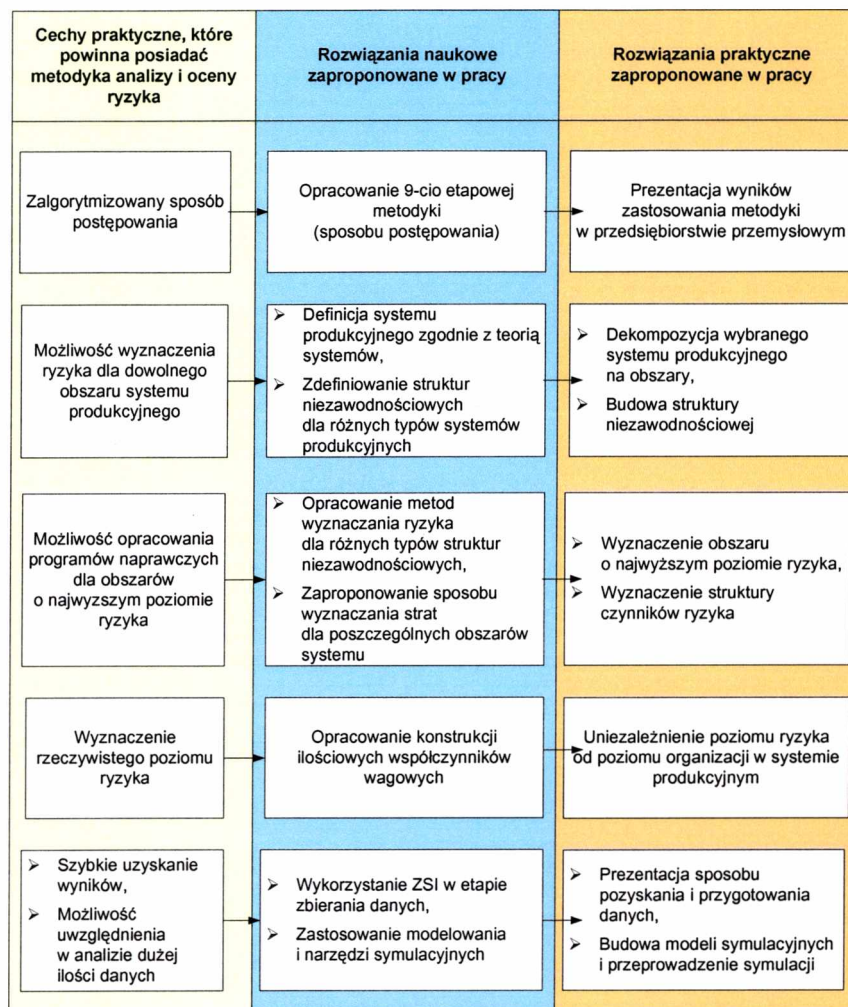
Rysunek 87. Podejścia, etapy i wyniki w opracowanej metodyce

W związku z powyższym, oraz wynikami weryfikacji w przedsiębiorstwie przemysłowym, przedstawionymi w rozdziale 7 i 8, opracowanej metodyki, tezę pracy:

„Operacyjny model symulacyjny systemu produkcyjnego o określonej strukturze niezawodnościowej umożliwia identyfikację, wartościowanie oraz lokalizację w systemie produkcyjnym czynników ryzyka, co pozwala na zapobieganie ich skutkom lub na ich eliminację.”

autor uważa za prawdziwą i udowodnioną.

Rysunek 88 przedstawia, cechy opracowanej metodyki przydatne w praktyce z punktu widzenia przedsiębiorstw przemysłowych oraz zaproponowane w pracy rozwiązania naukowe i praktyczne. Cechy te powinny przyczynić się do powszechnego stosowania metodyki w praktyce.



Rys. 88. Pożądane cechy metodyki z punktu widzenia przedsiębiorstw przemysłowych oraz rozwiązania naukowe i praktyczne uzyskane w pracy

W niniejszej pracy, w związku ze specyfiką przykładu praktycznego, ograniczono się jedynie do zarządzania procesami produkcyjnymi na poziomie operacyjnym. Jednak w opracowanej metodyce istnieje możliwość dekompozycji systemu produkcyjnego pod względem dowolnego kryterium oraz do dowolnego poziomu.

Aby analiza i ocena ryzyka decyzji produkcyjnych mogłaby być włączona na stałe w system zarządzania przedsiębiorstwem przemysłowym, dalsze prace powinny dotyczyć:

- możliwości analizy i oceny ryzyka na poziomie strategicznym, oraz włączenia jej wyników do opracowywania planów strategicznych przedsiębiorstw przemysłowych,

- możliwości włączenia jej wyników do systemów finansowych i kontrolingowych przedsiębiorstw produkcyjnych; umożliwiłoby to przedstawienie poziomu ryzyka w kontekście strat finansowych oraz wycenę opracowanych planów naprawczych,
- opracowania modelu programowego interfejsu, umożliwiającego import i eksport danych bezpośrednio z zintegrowanego systemu informatycznego do systemów symulacyjnego; umożliwiłoby to znacznie szybszą budowę modeli symulacyjnych oraz uwzględnienie wyników analizy ryzyka w systemie zarządzania produkcją,

Bibliografia:

1. Allen M. P., Tildesley J. D., *Computer simulation of liquids*, Clarendon Press, Oxford 1987;
2. Banaszak Z., Jamponński L., *Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych*, WNT, Warszawa 1991;
3. Bartosiewicz J., *Wykłady ze statystyki matematycznej*, PWN, Warszawa 1996;
4. Bateman R., Bowden R., Gogg T., Harrell C., Mott J., *System improvement using simulation*, PROMODEL Corporation, Fifth Edition, Utah 1997;
5. Benson D., *Simulation modeling and optimization using ProModel*, Winter Simulation Conference, Atlanta 1997;
6. Bizon – Górecka J., *Elementy ryzyka w przebiegu procesów produkcyjnych*, Przegląd Organizacji nr 10, 1997;
7. Bizon – Górecka J., *Inżynieria niezawodności i ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz 2001;
8. Bizon – Górecka J., *Niezawodność systemów produkcyjnych*, Przegląd Organizacji nr 5, 1997;
9. Bizon – Górecka J., *Problemy zarządzania ryzykiem w systemie produkcyjnym*, Przegląd Organizacji nr 6, 1998;
10. Bizon – Górecka J., *Systemowe zarządzanie ryzykiem jako panaceum na ryzyko zarządzania organizacją*, Przegląd Organizacji nr 9, 2002;
11. Bizon-Górecka J., *Określanie niezawodności produkcji budowlanej*, Rozprawy nr 29, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1988;
12. Brzeziński M., *Organizacja i sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 2002;
13. Bubnicki Z., *Podstawy informatycznych systemów zarządzania*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993;
14. Buła P., *Polityka ryzyka w przedsiębiorstwie*, Przegląd Organizacji nr 7, 1994;
15. Burduk A., Chlebus T., *Estimation of risk in manufacturing processes on an example of the carriage frames production line*, Conference Information Systems

- Applications and Technology ISAT 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003;
16. Burduk A., Chlebus T., Gajewski E., Wierzchowski L., *Ocena produktywności przedsiębiorstw metodami symulacyjnymi*, Konferencja Automatyzacja produkcji 2003. „Nauka – wiedza – innowacje”, materiały konferencyjne T.1. Referaty plenarne i sesyjne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003;
 17. Burduk A., Kowalski A., Chlebus T., *Variant simulation of starting-up production program*, Conference New Trends in System Simulation, Konferencja Automatyzacja produkcji 2000. „Wiedza – technika – postęp”, MARQ, Ostrava 2004;
 18. Cewe A. Nahorska H., Pancer I., *Tablice matematyczne*, Wydawnictwo Podkowa, Gdańsk 1999;
 19. Chajtman S., *Produktywność, wydajność, efektywność – systematyka czynników*, *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstw* nr 11, 1992;
 20. Chlebus E., *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa 2000;
 21. Chlebus E., Burduk A., *Procesowo zorientowane zarządzanie przedsiębiorstwem*, Konferencja Automatyzacja produkcji 2000. „Wiedza – technika – postęp”, materiały konferencyjne T.2. Referaty sesyjne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000;
 22. Chlebus E., Burduk A., Chlebus T., Kowalski A., *Opracowanie i optymalizacja planu Layout, analiza przepływu materiałów i marszrut transportowych w rozbudowywanej fabryce GKN Oleśnica na rok 2001*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002;
 23. Chlebus E., Burduk A., Chlebus T., Kowalski A., *Opracowanie i optymalizacja planu Layout, analiza przepływu materiałów i marszrut transportowych w rozbudowywanej fabryce GKN Oleśnica na rok 2004*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002;
 24. Chlebus E., Burduk A., Kowalski A., Chlebus T., *Analiza i optymalizacja parku maszynowego ramy wózka wagonu towarowego typu MD 523 w przedsiębiorstwie Bombardier Transportation (Zakład Wózków Wrocław)*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004;
 25. Chlebus E., Burduk A., Kowalski A., Chlebus T., *Określenie ryzyka i niezawodności realizacji programu produkcji ram wózków w przedsiębiorstwie Bombardier*

- Transportation*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004;
26. Chlebus E., Burduk A., Kowalski A., Chlebus T., *Wielowariantowa symulacja i optymalizacja layout'u zakładu Bombardier Transportation w celu osiągnięcia założonych na 2004 rok zdolności produkcyjnych*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004;
 27. Chlebus E., Burduk A., Susz S., *Systemy Workflow – modelowanie i symulacja przepływu pracy*, IV Konferencja „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, materiały konferencyjne T.1., WNT, Warszawa 2001;
 28. Chlebus E., Chrobot J., Knosala R., Krokosz-Krynke Z., Labok A., Rakowski J., Rudnicki J., Smalec Z., Weiss Z., *Systemy planowania i sterowania produkcją*, Konferencja: „Automatyzacja produkcji'97. Innowacje w technice i zarządzaniu”, Tom 1. Referaty plenarne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997;
 29. Chlebus E., Czajka J., Cholewa M., Borkowski T., Susz S., Burduk A., *Opracowanie systemu symulacji przebiegu procesów wytwórczych w przedsiębiorstwie*, Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001;
 30. Chong Y.Y., Brown E.M., *Zarządzanie ryzykiem projektu*, Oficyna Ekonomiczna, Kraków 2001;
 31. Chyliński A., *Metoda Monte Carlo*, Biblioteka Bankowa, Warszawa 1999;
 32. Claes P.F., *Risk management partners w epse*, Hes, Rotterdam 1999;
 33. Czekaj J., Dresler Z., *Podstawy zarządzania finansami firm*, PWN, Warszawa 1995;
 34. Drucker P.F., *The emergency theory of manufacturing*, Harvard Business Review nr 3, 1990;
 35. Durlík I., *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, Część I, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 1995;
 36. Durlík I., *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, Część II, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 1996;
 37. Erich A., *Ryzyko gospodarcze – Encyklopedia organizacji i zarządzania*, PWE, Warszawa 1981;
 38. Fishman G.S., *Symulacja komputerowa – pojęcia i metody*, PWE, Warszawa 1981;
 39. Gajda J.B., *Prognozowanie i symulacja a decyzje gospodarcze*, Wydawnictwo G.H. Beck, Warszawa 2001;

40. Gregor M., Košturiak J., Matuszek J., *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, Prace naukowe ITMiA Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, Seria: Konferencje nr 29, Automatykacja produkcji'97, Wrocław 1997;
41. Greń J., *Statystyka matematyczna – podręcznik programowy*, PWN, Warszawa 1987;
42. Grudzewski W., *Badania operacyjne w organizacji i zarządzaniu*, PWN, Warszawa 1985;
43. Gutenbaum J., *Modelowanie matematyczne systemów*, Wydawnictwo Omnitech Press, Warszawa 1992;
44. Harrell C., Ghosh K. B., Bowden R., *Simulation using ProModel*, Mc Graw Hill, Higher Education, 2000;
45. Hellwig Z., *Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*, PWN, Warszawa 1995;
46. <http://ekonom.univ.gda.pl/salomon/epm11.html>, aktualizacja 24.01.2003;
47. Ignasiak E., *Badania operacyjne*, PWE, Warszawa 2001;
48. Jajuga K., Jajuga T., *Jak inwestować w papiery wartościowe*, PWN, Warszawa 1994;
49. Jedynak P., Szydło S., *Zarządzanie ryzykiem*, Ossolineum, Wrocław 1997;
50. Jóźwiak J., Podgórski J., *Statystyka od podstaw*, PWE, Warszawa 1998;
51. Kaczmar J., Ronka – Chmielowiec W., *Zarządzanie ryzykiem w warunkach ubezpieczenia przedsiębiorstwa*, *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa* nr 8, 1996;
52. Kapliński O., *Klasyfikacja ryzyka w zarządzaniu według Andreasa Klinkego i Ortwin Renna*, *Przegląd Organizacji* nr 5, 2002;
53. Kapliński O., *Modeling of construction processes (a managerial approach)*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki KILiW PAN, Warszawa 1997;
54. Kassyk – Rokicka H., *Statystyka nie jest trudna. Mierniki statystyczne*, wyd. II, PWE, Warszawa 1994;
55. Kaźmierczak J., *Diagnozowanie stanu organizacji jako podstawa wdrażania systemów wspomagających zarządzanie*, V Konferencja „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, materiały konferencyjne T.1., WNT, Warszawa 2002;
56. Kaźmierczak J., *Eksplotacja systemów technicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000;

57. Kaźmierczak J., *Systemy komputerowego wspomagania w zarządzaniu eksploatacją (CAMM)*, III Szkoła „Komputerowe wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji”, materiały konferencyjne, Wydawnictwo Helion, Warszawa 1999;
58. Kiliński A., *Ogólna teoria niezawodności*, WNT, Warszawa 1971;
59. Kluge P.D., *Komputerowo wspomagany Controlling w małych i średnich przedsiębiorstwach*, Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 2001;
60. Kopaliński W., *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*, Muza S.A., Warszawa 1999, wydanie XXV;
61. Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W., *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, WNT, Warszawa 2002;
62. Korzeń Z., *Informatyczne systemy badań symulacyjnych i wizualizacji w logistyce – trendy rozwojowe i perspektywy nowych wdrożeń*, Materiały konferencyjne IV Międzynarodowej Konferencji w Katowicach, Tom I, PTL Poznań 1998;
63. Korzeń Z., *Informatyczne systemy badań symulacyjnych i wizualizacji w logistyce – trendy rozwojowe i perspektywy nowych wdrożeń*, IV Międzynarodowa konferencja LOGISTICS'98 „Zarządzanie łańcuchem dostaw” - materiały konferencyjne, Tom I, Zakład Poligraficzny ILiM, Poznań 1998;
64. Kościuszko Z., *Wektorowe funkcje niezawodności pewnych klas układów cybernetycznych*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1967;
65. Kosieradzka A., Lis S., *Produktywność. Metody analizy oceny i tworzenia programów poprawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000;
66. Koźmiński A.K., Piotrowski W., *Zarządzanie teoria i praktyka*, PWN, Warszawa 1996;
67. Kral Z., *Podstawy organizacji przygotowania produkcji*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985;
68. Kukuła K., *Badania operacyjne w przykładach i zadaniach*, PWN, Warszawa 2002;
69. Lasek M., Pęczkowski M., Otmianowski B., *Analiza procesów biznesowych z wykorzystaniem programów: iGrafx Process 2000 for Six Sigma / iGrafx FlowCharter 2000 Professional PL*, Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej i Zarządzania, Warszawa 2002;
70. Lis S., *Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych*, PWN, Warszawa 1994;
71. Lis S., *Organizacja i ekonomika procesów produkcyjnych w przemyśle maszynowym*, PWN, Warszawa 1984;

72. Matuszek J., *Inżynieria Produkcji*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku Białej, Bielsko Biała 200;
73. Matuszewski A., *Metoda analityczna oceny ryzyka podejmowanych przedsięwzięć rozwojowych*, Przemysł Drzewny nr 8, 1996;
74. Migdalski A., *Ogólna teoria niezawodności i jej zastosowanie w elektryce*, Przegląd Elektrotechniczny nr 3/84;
75. Migdalski J. i Zespół, *Inżynieria Niezawodności*, Wydawnictwo ZETOM, Warszawa 1992;
76. Moore P.G., *Ryzyko w podejmowaniu decyzji*, PWE, Warszawa 1975;
77. Nahotko S., *Ryzyko ekonomiczne w działalności gospodarczej*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz 1997;
78. Naisierowski W., *Metoda GERT*, Przegląd Organizacji, nr 2/1978;
79. Niziński S., Żółtowski B., *Informatyczne systemy zarządzania eksploatacją obiektów technicznych*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz 2001;
80. „Nonstop”, Ogólnopolski Magazyn dla Pracowników Bombardier Transportation, wydanie specjalne 2002;
81. Nowakowski T., *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*, Monografie nr 28, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999;
82. Ostasiewicz S., Rusnak Z., Siedlecka U., *Statystyka. Elementy teorii i zadania*, Wydawnictwo Ekonomiczne im. Oskara Langego, Wrocław 1999;
83. Ostrowska E., *Ryzyko projektów inwestycyjnych*, PWE, Warszawa 2002;
84. Pfohl C. H., *Systemy logistyczne*, Wydawnictwo Zoom, Poznań, 1998;
85. PN-1078, *Techniki analizy niezawodności. Metoda schematów blokowych niezawodności*;
86. PN-80/N-0400, *Niezawodność w technice. Terminologia*;
87. *ProModel 2001 Addendum*, PROMODEL Corporation, Utah 2001;
88. *ProModel 2002 User's Guide*, PROMODEL Corporation, Utah 2002;
89. Radościński E., *Symulacja komputerowa jako metoda poznania systemów ekonomicznych*, Prace Naukowe Instytutu Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988;

90. Ryniak A., Dziuba R., Chlebus E., Burduk A. Kowalski A., *Optymalizacja rozmieszczenia linii produkcyjnych w GKN Automotive Polska*, Konferencja „Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych”, materiały konferencyjne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002;
91. Santarek K., Strzelecza S., *Elastyczne systemy produkcyjne*, WNT, Warszawa 1989;
92. Sierpińska M., Jachna T., *Ocena przedsiębiorstw według standardów światowych*, PWN, Warszawa 1997;
93. Sink S., *Productivity management planning, measurement and evaluation, control and improvement*, John Willey & Sons, New York 1985;
94. Skołud B., Krenczyk D., *Warunki rozruchu systemu produkcji rytmicznej*, III Konferencja „Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie”, materiały konferencyjne T.II., WNT, Warszawa 2000;
95. Skołud B., *Planowanie wieloasortymentowej produkcji rytmicznej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Mechanika, zeszyt nr 136, Gliwice 2000;
96. Skwarczyński M., Kordos M., *Leksykon matematyczny*, Wiedza Powszechna, Warszawa 1993;
97. Szymczak M., *Słownik języka polskiego*, PWN, Warszawa 1996;
98. Waters D., *Zarządzanie operacyjne. Towary i usługi*, PWN, Warszawa 2001;
99. Wierzchowski L., Gajewski E., Kowalski A., Burduk A., Chlebus T., *Optymalizacja linii produkcyjnej ram wózków w Bombardier Transportation Polska*”, Konferencja „Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002;
100. Wilimowska Z., *Metodyka budowy efektywnego portfela projektów inwestycyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997;
101. Wilimowska Z., *Ryzyko jako czynnik wartości firmy*, VI Konferencja „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, materiały konferencyjne T.II., WNT, Warszawa 2003;
102. Wilimowska Z., *Ryzyko w wycenie wartości przedsiębiorstwa*, VII Konferencja „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, materiały konferencyjne T.I., WNT, Warszawa 2004;
103. Wilimowska Z. Wilimowski M., *Sztuka zarządzania finansami*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego Sp. z o.o., Bydgoszcz 2001;
104. Wiśniewski J. W., *Instrumenty decyzyjne przedsiębiorcy*, Wydawnictwo Gravis, Toruń 1991;

105. Witkowska D., *Metody statystyczne w zarządzaniu*, Firma Księgarsko-Wydawnicza „Menadżer”, Łódź 2001;
106. Wróblewski J. K., *Podstawy sterowania przepływem produkcji*, WNT, Warszawa 1993;
107. Wróblewski K., Krawczyński R., Kosieradzka A., Kasprzyk S., *Reguły priorytetu w sterowaniu przepływem produkcji*, WNT, Warszawa 1984;
108. Wrocławskie Centrum Transferu Technologii, *Statystyczne sterowanie procesem*, Politechnika Wrocławska 2001;
109. WU B., *Manufacturing systems design and analysis*, Chapman & Hall, 1994;
110. Zeigler B.P., *Teoria modelowania i symulacji*, PWN, Warszawa 1984;
111. Zeliaś A., *Statystyczne metody oceny ryzyka w działalności gospodarczej*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 1998;

Spis rysunków:

Rys. 1. Koncepcja ryzyka według podejścia amerykańskiego i niemieckiego	12
Rys. 2. Wybrane grupy definicji ryzyka	13
Rys. 3. Wybrane typy ryzyka gospodarczego i ekonomicznego spotykane w literaturze ...	16
Rys. 4. Klasy i grupy metod analizy i oceny ryzyka (na podstawie [77])	17
Rys. 5. Ilościowe metody analizy i oceny ryzyka	18
Rys. 6. Częstości skumulowane dla czasów operacji montażu.....	23
Rys. 7. Rozkład prawdopodobieństwa wartości oczekiwanej dla producenta granulatu A.	25
Rys. 8. Rozkład prawdopodobieństwa wartości oczekiwanej dla producenta granulatu B.	25
Rys. 9. Histogram częstości	30
Rys. 10. Schemat drzewa decyzyjnego	36
Rys. 11. Drzewo decyzyjne dla przykładu 13.	37
Rys. 12. Etapy i sposób postępowania w metodzie Monte Carlo [76]	38
Rys. 13. Podstawowe elementy sieci czynności w metodzie PERT	41
Rys. 14. Przykładowa sieć czynności.....	42
Rys. 15. Stochastyczna sieć procesu [77]	46
Rys. 16. Ogólny schemat pracy.....	54
Rys. 17. Wieloprzekrojowa dekompozycja systemu produkcyjnego z uwagi na wybrane klasyfikatory.....	58
Rys. 18. Główne elementy i ich składowe opisujące proces produkcyjny [20].....	60
Rys. 19. Struktura podstawowych parametrów procesu produkcyjnego [20].....	61
Rys. 20. Schemat struktury produkcyjno-administracyjnej przyjęty w pracy [12, 71].....	62
Rys. 21. Podstawowe elementy i relacje modelowania i symulacji systemów produkcyjnych.....	67
Rys. 22. Zadanie typu analiza w modelowaniu systemów produkcyjnych [70]	69
Rys. 23. Zadanie typu synteza w modelowaniu systemów produkcyjnych [70]	69
Rys. 24. Przebieg eksperymentu symulacyjnego [63]	70
Rys. 25. Różnice pomiędzy symulacją stochastyczną (a) a deterministyczną (b) [71]	71
Rys. 26. Przykład zmian podczas eksperymentu za pomocą symulacji dyskretnej [44]	71
Rys. 27. Porównanie wyników uzyskanych z symulacji ciągłej i dyskretnej [44]	72
Rys. 28. Modelowanie symulacyjne dyskretne i ciągłe systemów produkcyjnych [91].....	72
Rys. 29. Ogólny schemat systemu	75
Rys. 30. Rozszerzony schemat systemu.....	76
Rys. 31. Schemat systemu produkcyjnego.....	77
Rys. 32. Schemat idei sterowania przebiegiem procesu produkcyjnego	79
Rys. 33. Związki klasycznej i ogólnej teorii niezawodności [75].....	83
Rys. 34. Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi szeregowo	86
Rys. 35. Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego: P – piła, T – tokarka, F – frezarka, S - szlifierka	86
Rys. 36. Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi równolegle	87
Rys. 37. Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej z nadmiarami systemu produkcyjnego: Sp T – stanowisko pracujące tokarka, Sr T – stanowisko rezerwowe tokarka.	88
Rys. 38. Przykład produkcyjnej struktury równoległej	88
Rys. 39. Przykładowy schemat układu szeregowo-równoległego	89
Rys. 40. Przykład struktury systemu produkcyjnego szeregowo - równoległej z nadmiarami: P – piła, T – tokarka, Sp F – stanowisko pracujące frezarka, Sr F – stanowisko rezerwowe frezarka, S - szlifierka	90

Rys. 41. Przykład produkcyjnej struktury szeregowo - równoległej	90
Rys. 42. Elementy składowe metodyki aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych	92
Rys. 43. Przykład struktury szeregowej systemu o n obszarach	96
Rys. 44. Przykład struktury niezawodnościowej systemu o n obszarach	97
Rys. 45. Przykład struktury niezawodnościowej systemu o 6 obszarach	100
Rys. 46. Etapy postępowania w metodyce aplikacji modeli symulacyjnych planowania i oceny ryzyka realizacji procesów produkcyjnych	104
Rys. 47. Proces produkcyjny korpusu belki bujakowej	105
Rys. 48. Szeregową strukturę analizowanego procesu	107
Rys. 49. Modele symulacyjne zbudowane w celu oceny ryzyka korpusu belki bujakowej	109
Rys. 50. Wyniki uzyskane z symulacji modeli	109
Rys. 51. Straty czasu w poszczególnych obszarach procesu produkcji korpusu	110
Rys. 52. Przyrosty poziomów ryzyka w poszczególnych obszarach systemu spowodowane oddziaływaniem czynników r_1 i r_2	111
Rys. 53. Części projektu oraz zadania wyznaczone do realizacji	115
Rys. 54. Plan zakładu oraz wstępny projekt usytuowania naw produkcyjnych na hali [26]	116
Rys. 55. Schemat systemu produkcyjnego analizowanego przedsiębiorstwa	117
Rys. 56. Etapy procesu produkcyjnego [17]	119
Rys. 57. Uproszczona struktura ramy MD 523 (a); wózek MD 523 wraz z elementami składowymi (b)	119
Rys. 58. Pierwotny layout linii produkcyjnej ramy MD 523	120
Rys. 59. Obszary systemu produkcyjnego i przeanalizowane w nich dane	120
Rys. 60. Zestawienie produktywności, otrzymanej i brakującej, dla wybranych stanowisk	122
Rys. 61. Zoptymalizowany i zaakceptowany plan layout ramy MD 523	123
Rys. 62 Zestawienie produktywności, otrzymanej i po wprowadzonych zmianach, dla wybranych stanowisk	124
Rys. 63. Propozycja przypisania projektów do poszczególnych naw produkcyjnych [26]	125
Rys. 64. Obciążenia poszczególnych naw produkcyjnych po wprowadzonych zmianach organizacyjnych	125
Rys. 65. Ostatecznie przyjęty plan layout zakładu	126
Rys. 66. Wykres Sankey'a dla przyjętego planu hali produkcyjnej	127
Rys. 67. Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego	130
Rys. 68. Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego całego zakładu	130
Rys. 69. Szeregową strukturę niezawodnościową systemu produkcyjnego wyrobu reprezentatywnego	131
Rys. 70. Produkcyjną strukturę równoległą systemu produkcyjnego całego zakładu	131
Rys. 71. Czynniki ryzyka wyodrębnione w poszczególnych obszarach procesu produkcyjnego ramy MD 523 oraz ich oznaczenia	132
Rys. 72. Nazwy modeli analizujące poszczególne czynniki ryzyka	140
Rys. 73. Produktywność w poszczególnych modelach w założonym okresie analizy T (12 tygodni)	141
Rys. 74. Czas potrzebny na wyprodukowanie 138 sztuk wyrobu	141
Rys. 75. Straty czasu w poszczególnych modelach spowodowane występowaniem czynników ryzyka	142

Rys. 76. Poziomy ryzyka w poszczególnych modelach.....	143
Rys. 77. Procentowe udziały przyczyn zakłóceń w poziomach ryzyka w podziale na obszary systemu	144
Rys. 78. Wielkości ryzyk poszczególnych wyrobów.....	146
Rys. 79. Procentowy udział ryzyka w rozbiciu na obszary systemu produkcyjnego.....	147
Rys. 80. Różnice czasów wybranych obszarów bez i z zapasem bezpieczeństwa	147
Rys. 81. Sieć czynności dla procesu produkcji belki poprzecznej ramy wózka MD 523..	150
Rys. 82. Sieć czynności dla procesu produkcji podłużnicy ramy wózka MD 523	151
Rys. 83. Sieć czynności dla procesu produkcji belki bujakowej ramy wózka MD 523	152
Rys. 84. Sieć czynności dla procesu produkcji korpusu belki bujakowej ramy wózka MD 523.....	153
Rys. 85. Sieć czynności dla procesu produkcji ramy wózka MD 523	153
Rys. 86. Diagram PERT procesu produkcyjnego ramy wózka MD 523	154
Rysunek 87. Podejścia, etapy i wyniki w opracowanej metodyce.....	158
Rys. 88. Pożądane cechy metodyki z punktu widzenia przedsiębiorstw przemysłowych oraz rozwiązania naukowe i praktyczne uzyskane w pracy.....	159
Rys. 89. Krzywa rozkładu normalnego i jej podstawowe własności	179
Rys. 90. Dystrybucja rozkładu normalnego	180
Rys. 91. Struktura produktu i procesu produkcyjnego belki poprzecznej	185
Rys. 92. Struktura produktu i procesu produkcyjnego podłużnicy	185
Rys. 93. Struktura produktu i procesu produkcyjnego belki bujakowej	186
Rys. 94. Struktura produktu i procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej	186
Rys. 95. Struktura produktu i procesu produkcyjnego ramy wózka MD 523.....	187

Spis tabel:

Tabela 1. Macierz decyzyjna [21]	14
Tabela 2. Dane do przykładu 1 zastosowania metody analitycznej – czasy montażu silnika	23
Tabela 3. Dane do przykładu 2 – porównanie danych wejściowych na temat producentów granulatu A i B.....	24
Tabela 4. Dane do przykładu 2 - wyniki porównań dla producenta granulatu A i B.....	25
Tabela 5. Dane do przykładu 5 - możliwe korzyści związane z danym stanem natury [21]	27
Tabela 6. Dane do przykładu 5 - prawdopodobieństwa warunkowe	27
Tabela 7. Oczekiwane korzyści a posteriori.....	27
Tabela 8. Dane do przykładu 6 - wyniki kontroli jakości 10-ciu partii produkcyjnych	28
Tabela 9. Dane do przykładu 8 - czasy naprawy braków.....	30
Tabela 10. Dane do przykładu 9 – pomiary zużycia wody	31
Tabela 11. Dane do przykładu 10 - liczba pracowników i uzyskana wielkość produkcji.	32
Tabela 12. Dane do przykładu 12 – nakłady surowców na produkcje wyrobów oraz ich zapasy [46].....	34
Tabela 13. Dane do przykładu 12 - I tablica simpleksowa do przykładu 11 [46].....	35
Tabela 14. Dane do przykładu 12 - IV (ostatnia) tablica simpleksowa do przykładu 12 [46]	35
Tabela 15. Dane do przykładu 14 - wygenerowane losowo wartości wpływów i wydatków [4].....	39
Tabela 16. Dane do przykładu 14 - wyniki finansowe dla ustalonych liczb losowych [4]	39
Tabela 17. Dane do przykładu 14 - rozkład prawdopodobieństwa wyniku finansowego [4]	40
Tabela 18. Dane do przykładu 15 - Charakterystyki czasowe operacji technologicznych wykorzystywane w przykładzie metody PERT	43
Tabela 19. Wierzchołki sieci czynności [61]	44
Tabela 20. Redukcja grafów z wykorzystaniem grafów zastępczych [61]	45
Tabela 21. Przykłady wskaźników produktywności cząstkowej [31].....	64
Tabela 22. Założony na 2005 rok plan sprzedaży oraz przyjęta technologia	114
Tabela 23. Zestawienie uzyskanych wyników obciążenia stanowisk pracy i ich produktywności.....	122
Tabela 24. Zestawienie uzyskanych wyników obciążeń stanowisk pracy i ich produktywności.....	123
Tabela 25. Wydajność teoretyczna dla poszczególnych linii produkcyjnych – wartości celów	129
Tabela 26. Teoretyczne wartości celu dla okresu reprezentatywnego	133
Tabela 27. Zestawienie danych na temat dostaw blach w rozpatrywanym okresie.....	135
Tabela 28. Zestawienie danych na temat wadliwych elementów z kooperacji w okresie T	135
Tabela 29. Zestawienie postojów spowodowanych brakiem materiałów z kooperacji dla belki bujawkowej.....	136
Tabela 30. Zestawienie różnic pomiędzy czasami technologicznymi a rzeczywistymi ...	136
Tabela 31. Zestawienie postojów oraz ich przyczyn.....	137
Tabela 32. Zestawienie czasów korekt dla poszczególnych operacji	138
Tabela 33. Wyniki produktywności w poszczególnych modelach dla założonego okresu T oraz czas produkcji 138 sztuk wyrobu [tyg.].....	140

Tabela 34. Wyniki symulacji modeli oraz przyjęte w metodzie oznaczenia	142
Tabela 35. Dane potrzebne w metodzie	145
Tabela 36. Wielkości strat oraz ryzyka dla poszczególnych wyrobów.....	145
Tabela 37. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji belki poprzecznej ramy wózka MD 523	150
Tabela 38. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji podłużnicy ramy wózka MD 523	151
Tabela 39. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji belki bujakowej ramy wózka MD 523	152
Tabela 40. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji korpusu belki bujakowej ramy wózka MD 523	153
Tabela 41. Charakterystyki czasowe w procesie produkcji ramy wózka MD 52	153
Tabela 42. Podstawowe pojęcia używane w rachunku prawdopodobieństwa i w statystyce matematycznej.	176

ZAŁĄCZNIK 1

PODSTAWOWE CHARAKTERYSTYKI ZMIENNEJ LOSOWEJ

- 1.1. Wprowadzenie do rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej
- 1.2. Podstawowe miary statystyczne
- 1.3. Podstawowe charakterystyki zmiennych losowych ciągłych
- 1.4. Zależności cech

1.1 Wprowadzenie do rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej

Ścisły związek między rachunkiem prawdopodobieństwa i statystyką wprowadza szereg utrudnień w metodach szacowania ryzyka, gdyż należy dokładnie ustalić, czy analizowane zagadnienie dotyczyć będzie zmiennej losowej czy też cechy (zmiennej) statystycznej. Dla każdego z przypadków inaczej będą się przedstawiać miary ryzyka.

Statystyka matematyczna powstała na gruncie rachunku prawdopodobieństwa i jest integralną częścią probabilistyki. Zajmuje się modelami matematycznymi (przede wszystkim teorią prawdopodobieństwa), które służą do badania zjawisk losowych [18]. Związek statystyki z rachunkiem prawdopodobieństwa najlepiej można przedstawić przytaczając statystyczną definicję prawdopodobieństwa: *”Jeżeli przy wielokrotnej realizacji doświadczeń, w wyniku których może wystąpić zdarzenie A , częstość tego zdarzenia przejawia wyraźną prawidłowość, oscylując wokół pewnej nieznanej liczby p , i jeśli wahania częstości przejawiają tendencję malejącą w miarę wzrostu liczby doświadczeń, to liczba p nazywa się prawdopodobieństwem zdarzenia A ”* [45].

Podstawą dla analiz statystycznych badanej cechy jest określenie tzw. *empirycznego rozkładu cechy*, który polega na przyporządkowaniu uszeregowanym rosnąco wartościom, przyjmowanym przez tę cechę, odpowiednio zdefiniowanych częstości ich występowania. W przypadku *cechy ciągłej* określenie rozkładu odbywa się poprzez przyporządkowanie liczebności (częstości) odpowiednim przedziałom wartości cechy, a nie konkretnym jej wartościom jak dla *zmiennych skokowych* [50]. Takie przedziały dla zmiennych ciągłych nazywa się *przedziałami klasowymi*.

W statystyce matematycznej całą zbiorowość, mającą przynajmniej jedną właściwość wspólną dla wszystkich jej elementów oraz przynajmniej jedną właściwość wyróżniającą te elementy, nazywamy *populacją generalną* (lub *zbiorowością generalną* lub *populacją*) [7]. Część populacji, na podstawie której wnioskuje się o całości, to *próba* [7]. Próba dobrze odzwierciedlająca właściwości populacji jest próbą reprezentatywną.

Traktowanie rozkładu wartości cechy w populacji generalnej jako rozkładu zmiennej losowej w konsekwencji powoduje iż pewne charakterystyki danej cechy są traktowane jako parametry rozkładu odpowiedniej zmiennej losowej. *Zmienna losowa* jest to cecha zdarzenia losowego, wyrażona we właściwych jednostkach ilościowych. Jest nią np. czas pracy, zużycie podstawowych materiałów itp. (ponieważ podlegają zmienności wynikającej z szeregu najrozmaitszych czynników). W toku prowadzenia badań nad systemem produkcyjnym obserwuje się *zdarzenia losowe*, tj. takie, których rezultatu nie można przewidzieć, pomimo sprecyzowania warunków w jakich są realizowane. W miarę

zwiększania liczebności obserwacji, częstość określonego zdarzenia waha się wokół pewnej liczby, która staje się prawdopodobieństwem w wyniku znacznego zwiększenia wielkości doświadczeń (porównaj prawo wielkich liczb). Porównanie podstawowych pojęć rachunku prawdopodobieństwa i statystyką przedstawia tabela 50.

Tabela 50. Podstawowe pojęcia używane w rachunku prawdopodobieństwa i w statystyce matematycznej.

RACHUNEK PRAWDOPODOBIENSTWA	STATYSTYKA MATEMATYCZNA
zmienna losowa	cecha statystyczna
prawdopodobieństwo	częstość
rozkład zmiennej losowej	szereg (rozdzielczy) częstości cechy
wykres rozkładu zmiennej losowej	histogram częstości badanej cechy
wartość oczekiwana	średnia arytmetyczna
wariancja	wariancja
odchylenie standardowe	odchylenie standardowe

1.2 Podstawowe miary statystyczne

Średnia arytmetyczna

Podstawową miarą statystyczną stosowaną często w praktyce w planowaniu i kontroli, lecz nie będącą miarą ryzyka, jest średnia arytmetyczna [77]. Zalicza się ona do tzw. „klasycznych miar rozkładu”. Średnia arytmetyczna ($\bar{x}$) jest sumą wartości cechy w całym zbiorze, podzieloną przez liczebność tego zbioru. Wzór na średnią arytmetyczną przedstawia się następująco [50]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (Z1.1)$$

gdzie:

x_j ($j = 1, \dots, n$) - są indywidualnymi obserwacjami w zbiorze danych ,

n - jest liczbą obserwacji.

Średnia arytmetyczna ma szereg następujących własności [77, 50, 105, 3]:

- wszystkie wartości zbioru są uwzględnione w obliczeniach, a zmiana jakiegokolwiek wartości w zbiorze pociąga za sobą zmianę wartości średniej arytmetycznej,
- wartość jej nie może być mniejsza od najmniejszej wartości badanej cechy i nie może być większa od wartości największej,
- suma odchyleń (różnic) wartości zmiennych badanej cechy od średniej arytmetycznej jest równa zeru, tzn.:

$$\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}) = 0$$

- suma kwadratów odchyłeń wartości zmiennych badanej cechy od średniej jest najmniejsza, oznacza to że suma kwadratów odchyłeń poszczególnych wartości zmiennych od jakiegokolwiek innej wartości zmiennej, różnej od średniej, będzie zawsze większa:

$$\sum_{j=1}^n (x_j - C)^2 = \min \quad \text{dla } C = \bar{x},$$

- iloczyn średniej i liczebności jest równy łącznej wartości cechy w zbiorze:

$$\bar{x}n \sum_{j=1}^n x_j;$$

Zaletami średniej arytmetycznej są [3, 50, 77, 105]:

- do jej obliczenia wykorzystuje się wszystkie dane charakteryzujące rozkład zmiennej losowej,
- jej wartość nie zależy od liczebności zbioru, lecz od wzajemnych proporcji badanej cechy, co w praktyce oznacza możliwość jej obliczania z szeregów, gdzie zamiast liczebności znane są jedynie wskaźniki struktury,
- może być ona wykorzystywana w dalszych obliczeniach statystycznych.

Za wady średniej arytmetycznej można uznać [3, 50, 77, 105]:

- możliwość przyjmowania przez nią wartości nie występujących w badanej zbiorowości lub w ogóle nie przyjmowanych przez badaną cechę,
- może ona wprowadzać w błąd w przypadku gdy jeden lub kilka wyników są „nienormalnie duże lub małe”.

W zależności od rozkładu cechy statystycznej oraz konieczności nadania pewnym wartościom pomiaru odpowiedniego większego znaczenia można posłużyć się również średnią geometryczną, harmoniczną, medianą, dominantą lub innymi średnimi [105].

Wartość oczekiwana

Dla zmiennych losowych odpowiednikiem średniej arytmetycznej jest wartość oczekiwana. Wielkość ta charakteryzuje przeciętną wartość przyjmowaną przez zmienną losową. Wzór na wartość oczekiwaną zmiennej losowej przedstawia się wzorem [50]:

$$E(X) = \begin{cases} \sum_i x_i p_i & \text{dla zmiennej losowej skokowej,} \\ \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx & \text{dla zmiennej losowej ciągłej,} \end{cases} \quad (Z.1.2)$$

gdzie:

p_i - funkcja prawdopodobieństwa zmiennej losowej X , przyjmującej wartości $x_i (i = 1, 2, \dots)$,
 $f(x)$ – funkcja gęstości.

Wartość oczekiwana jest nazywana również wartością przeciętną, średnią, a także nadzieją matematyczną.

Miary średnie określają przeciętny poziom zjawiska, nie informują jednak o zmienności badanej cechy. Do charakterystyk opisujących rozkład cechy należą *miary dyspersji*, zwane inaczej *miarami rozrzutu, zróżnicowania* lub *rozproszenia*. Pozwalają one mierzyć zróżnicowanie wartości zmiennej w ramach badanej zbiorowości, a zatem informują, jak duże są różnice (odchylenia) między poszczególnymi wartościami jednostek zbiorowości a miarą przeciętności [105].

1.3 Podstawowe charakterystyki zmiennych losowych ciągłych

Funkcja gęstości

Funkcją gęstości zmiennej losowej X typu ciągłego nazywa się funkcję $f(x)$ określoną następująco [50]:

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X \leq x + \Delta x)}{\Delta x}, \quad (\text{Z.1.3})$$

gdzie P - prawdopodobieństwo

Dystrybuanta

Rozkład zmiennej losowej X typu ciągłego można scharakteryzować także za pomocą dystrybuanty określonej następująco [50]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt, \quad (\text{Z.1.4})$$

gdzie $f(t)$ - funkcja gęstości zmiennej losowej X .

Dystrybuanta $F(x)$ zmiennej losowej X typu ciągłego ma następujące własności:

- $0 \leq F(x) \leq 1$ dla $x \in R$,
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ oraz $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$,
- jest funkcją niemalejącą i prawoskrętnie ciągłą.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa

Funkcją gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej typu ciągłego jest funkcja $f(x)$, określona na zbiorze liczb rzeczywistych, o następujących własnościach [50]:

- $f(x) \geq 0$,

$$\triangleright \int_a^b f(x)dx = P(a < X \leq b) \quad \text{dla dowolnych } a < b.$$

Graficzną interpretacją całki $\int_a^b f(x)dx$ jest pole obszaru ograniczonego wykresem funkcji $f(x)$, osią odciętych i prostymi $x = a$, $x = b$. Zostało to przedstawione na rysunku 90.

Rozkład normalny zmiennej losowej

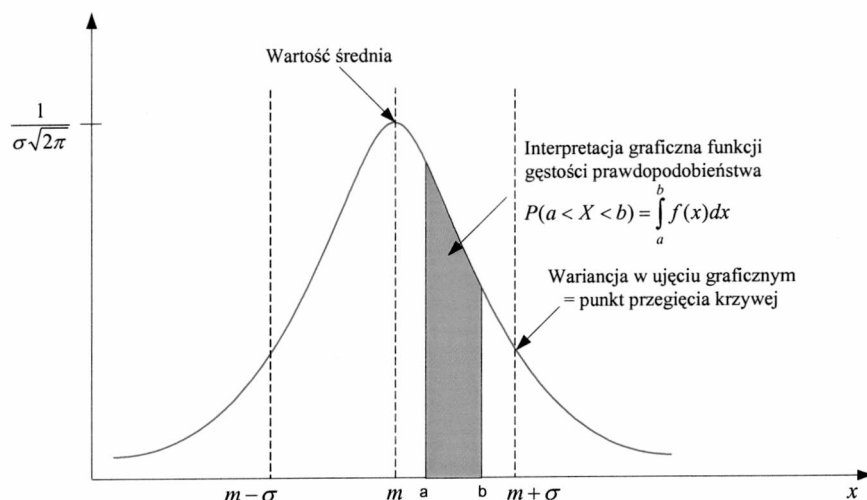
Rozkład normalny jest najważniejszym, zarówno w rozważaniach teoretycznych jak i w praktycznych zastosowaniach statystyki matematycznej, rozkładem ciągłej zmiennej losowej [41]. Rozkładowi normalnemu podlega najwięcej zjawisk zachodzących w przyrodzie. Jest on jednym z najbardziej powszechnych rozkładów stosowanych w przypadku procesów przemysłowych [108].

Zmienna losowa X ma rozkład normalny o parametrach m oraz σ , co w skrócie zapisuje się jako $X: N(m, \sigma)$, jeśli jej funkcja gęstości ma następującą postać[50]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty \quad (\text{Z.1.5})$$

przy czym $\sigma > 0$.

Wykres tej funkcji, okreśłany zwykle jako krzywa normalna (lub krzywa Gaussa), ma charakterystyczny kształt taki jak na rysunku 89



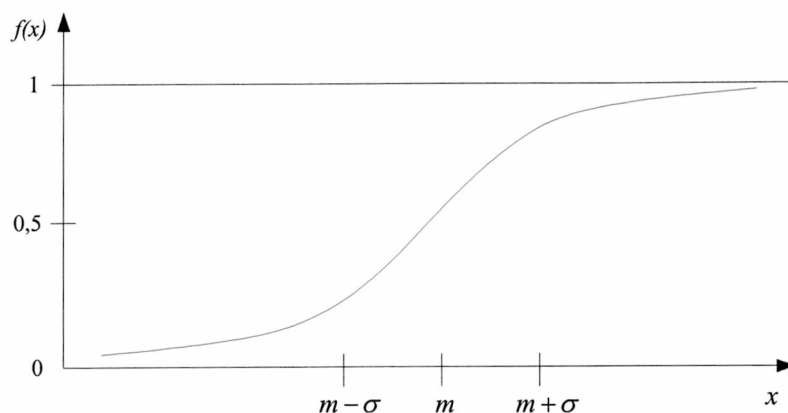
Rys. 89. Krzywa rozkładu normalnego i jej podstawowe własności

Dystrybuanta rozkładu normalnego

Dystrybuanta rozkładu normalnego, zgodnie ze wzorem (Z.1.4) ma postać:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (\text{Z.1.6})$$

Wykres dystrybuanty zmiennej losowej $X: N(m, \sigma)$ przedstawiono na rysunku 90.



Rys. 90. Dystrybuanta rozkładu normalnego

We wzorze (Z.1.6) występują dwa parametry: m oraz σ , określające w jednoznaczny sposób postać funkcji gęstości (π i e są stałymi). Znaczenie tych parametrów ujawnia się po obliczeniu wartości oczekiwanej i wariancji w rozkładzie normalnym:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx = m \quad (\text{Z.1.7})$$

$$D^2(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma^2 \quad (\text{Z.1.8})$$

Parametr m oznacza zatem średnią zmiennej losowej X o rozkładzie normalnym, a parametr σ - jej odchylenie standardowe.

Krzywa gęstości rozkładu normalnego ma następujące własności [50]:

- jest symetryczna względem prostej $x = m$,
- osiąga maksimum równe $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ dla $x = m$,
- jej ramiona mają punkty przegięcia dla $x = m - \sigma$ oraz $x = m + \sigma$.

Standaryzacja zmiennej losowej

Obliczanie prawdopodobieństwa na zadanym przedziale (a, b) rozkładu normalnego jest bardzo kłopotliwe, ponieważ prawdopodobieństwo to równe jest polu pod krzywą i wymagałoby całkowania funkcji gęstości z odpowiednimi parametrami w granicach a i b . W takich przypadkach sprowadza się dowolny rozkład normalny do postaci tzw. standardowego rozkładu normalnego, dla którego funkcja gęstości i dystrybuanta zostały tablicowane. Standardowym rozkładem normalnym $N(0, 1)$ nazywa się rozkład normalny ze średnią $m = 0$ oraz odchyleniem standardowym $\sigma = 1$. Zmienną losową mającą standardowy rozkład normalny przyjęło się oznaczać przez U , jej funkcję gęstości $\varphi(u)$, natomiast dystrybuantę przez $\Phi(u)$.

Ze względu na symetrię funkcji $\varphi(u)$ względem prostej $u = 0$ w tablicach są podane często wartości obu funkcji tylko dla dodatnich u . Przy wyznaczaniu wartości $\varphi(u)$ i $\Phi(u)$ dla ujemnych u korzysta się wtedy z następujących własności tych funkcji [50]:

$$\text{➤ } \varphi(u) = \varphi(-u), \text{ oraz} \quad (\text{Z.1.9})$$

$$\text{➤ } \Phi(u) = 1 - \Phi(-u) \quad (\text{Z.1.10})$$

Operacja zwana standaryzacją (normowaniem) zmiennej losowej X umożliwia korzystanie z tablic standardowego rozkładu normalnego przy obliczaniu prawdopodobieństw postaci $P(a < X \leq b)$ dla zmiennej losowej X o rozkładzie z parametrami m i σ . Można mianowicie dowieść, że jeśli zmienna losowa X ma rozkład $N(m, \sigma)$, to zmienna standaryzowana [50]:

$$U = \frac{X - m}{\sigma} \quad (\text{Z.1.11})$$

Na tej podstawie otrzymujemy że [50]:

$$P(a < X \leq b) = P\left(\frac{a - m}{\sigma} < \frac{X - m}{\sigma} \leq \frac{b - m}{\sigma}\right) = P\left(\frac{a - m}{\sigma} < U \leq \frac{b - m}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{b - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - m}{\sigma}\right)$$

Wartości $\Phi\left(\frac{b - m}{\sigma}\right)$ i $\Phi\left(\frac{a - m}{\sigma}\right)$ należy odczytać w tablicach dystrybucyj standardowego rozkładu normalnego.

Twierdzenie Bayesa

Obliczając prawdopodobieństwa złożonych zdarzeń lub ciągów zdarzeń korzysta się zazwyczaj ze znajomości prawdopodobieństw zdarzeń bardziej elementarnych opartych o podstawowe reguły rachunkowe z teorii prawdopodobieństwa. Naturalną reakcją każdego, kto stanie przed problemem podjęcia decyzji w sytuacji, w której występuje element niepewności, jest dążenie do usunięcia tej niepewności przez odkrycie prawdy o faktycznym stanie rzeczy. Dysponując taką wiedzą oblicza się uaktualnione prawdopodobieństwa a posteriori w oparciu o wcześniej wyznaczone prawdopodobieństwa a priori. Jedną z metod umożliwiających obliczanie prawdopodobieństw a posteriori jest metoda Bayes'a. Twierdzenie Bayesa jest niewielkim rozszerzeniem prawdopodobieństwa warunkowego [50].

Niech $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ będą zdarzeniami jedynie możliwymi i nawzajem się wykluczającymi zaś B będzie zdarzeniem, które może zajść tylko pod warunkiem zajścia jednego ze zdarzeń A_i . Wtedy prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia E_i pod warunkiem że zaszło zdarzenie B , dane jest wzorem [92]:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i)P(B|A_i)} \quad (Z.1.12)$$

1.4 Zależności cech

Przy badaniu populacji dwuwymiarowej (X, Y) istotną sprawą jest czy i jak mocno skorelowane są zmienne X i Y . Odbyna się to poprzez analizę własności współczynnika korelacji, który w rozkładzie empirycznym zmiennych X i Y określony jest wzorem [50]:

$$r = \frac{c_{xy}}{s_x s_y}, \quad (Z.1.13)$$

gdzie c_{xy} - jest kowariancją w dwuwymiarowym rozkładzie empirycznym opisaną wzorem:

$$c_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})n_{ij}, \quad (Z.1.14)$$

natomiast

s_x, s_y - są odchyleniami standardowymi w empirycznych rozkładach brzegowych odpowiednio zmiennej X i Y .

Współczynnik korelacji określa kierunek zależności. Mierzy bowiem liniowe skorelowanie zmiennych.

W sposób analityczny kształtowanie się wartości jednej zmiennej losowej pod wpływem drugiej można przedstawić przy pomocy tzw. **modelu regresji**. Głównym składnikiem każdego modelu regresji jest funkcja regresji, której postać analityczną określa się najczęściej na podstawie wyników próby losowej. Parametry tej funkcji podlegają estymacji opartej na próbie losowej za pomocą procedur ustalonych w ramach teorii korelacji i regresji.

Spośród wielu możliwych postaci modelu regresji podstawowe znaczenie ma tzw. **klasyczny model regresji liniowej**. W przypadku pierwszego modelu, dla każdej wartości ustalonej zmiennej X , druga zmienna losowa Y ma warunkowy rozkład z wartością oczekiwaną:

$$E(Y | X = x) = \alpha x + \beta \quad (Z.1.15)$$

oraz wariancją:

$$D^2(Y | X = x) = \sigma^2 \quad (Z.1.16)$$

Zapis (Z.1.15) oznacza, że funkcja regresji I rodzaju Y względem X jest liniowa, a zapis (Z.1.16) oznacza, że wariancja zmiennej losowej Y w jej warunkowych rozkładach jest stała (nie zależy od wartości x).

W klasycznym modelu regresji liniowej zmienna losowa Y pełni rolę zmiennej zależnej, natomiast X jest zmienna niezależną. Parametr α prostej regresji pierwszego

rodzaju jest określany jako współczynnik regresji liniowej i ma następująca interpretację: jest to wielkość, o jaką zmienia się warunkowa wartość oczekiwana zmiennej Y , gdy x wzrasta o jednostkę.

Klasyczny model regresji liniowej można przedstawić także za pomocą ciągu par $(x_1, Y_1), (x_2, Y_2), \dots, (x_n, Y_n)$ n -elementowej próby losowej z populacji dwuwymiarowej, stanowiącej podstawę estymacji parametrów badanej zależności. Przyjmując, że zachowane są warunki klasycznej regresji liniowej, kształtowanie się wartości Y_i w próbie losowej można przedstawić następująco [50]:

$$Y_i = E(Y | X = x_i) + \varepsilon_i = \alpha x + \beta + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (Z.1.17)$$

gdzie ε_i - są zmiennymi losowymi, takimi że:

$$E \varepsilon_i = 0, \quad (Z.1.18)$$

$$D^2(\varepsilon_i) = E \varepsilon_i^2 = \sigma^2, \quad (Z.1.19)$$

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E \varepsilon_i \varepsilon_j = 0 \text{ dla } i \neq j \quad (Z.1.20)$$

Estymacja parametrów α i β

Do estymacji parametrów klasycznego modelu regresji liniowej wykorzystuje się metodę najmniejszych kwadratów. Zagadnienie to sprowadza się do doboru takich wartości współczynników równania linii prostej, aby jej wykres możliwie dobrze „pasował” do punktów reprezentujących na wykresie rozrzuty poszczególnych obserwacji próby. Kryterium dopasowania prostej do danych z próby, według metody najmniejszych kwadratów, jest minimalizacja sumy kwadratów długości „pionowych” odcinków łączących punkty empiryczne z prostą. Kryterium to można zapisać następująco [50]:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - (\alpha x_i + \beta)]^2 \rightarrow \min. \quad (Z.1.21)$$

Wyrażenie S jest funkcją niewiadomych α i β . Po zróźniczkowaniu wyrażenia S względem niewiadomych α i β , przyrównaniu pochodnych do zera oraz rozwiązaniu układu równań normalnych otrzymujemy że:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ oraz} \quad (Z.1.22)$$

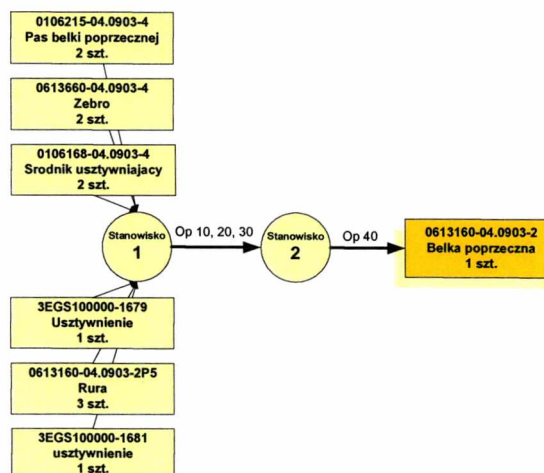
$$\hat{\beta} = \bar{Y} - \hat{\alpha} \bar{x}. \quad (Z.1.23)$$

ZAŁĄCZNIK 2

SZCZEGÓŁOWA STRUKTURA WYROBU I PROCESU RAMY WÓZKA MD 523

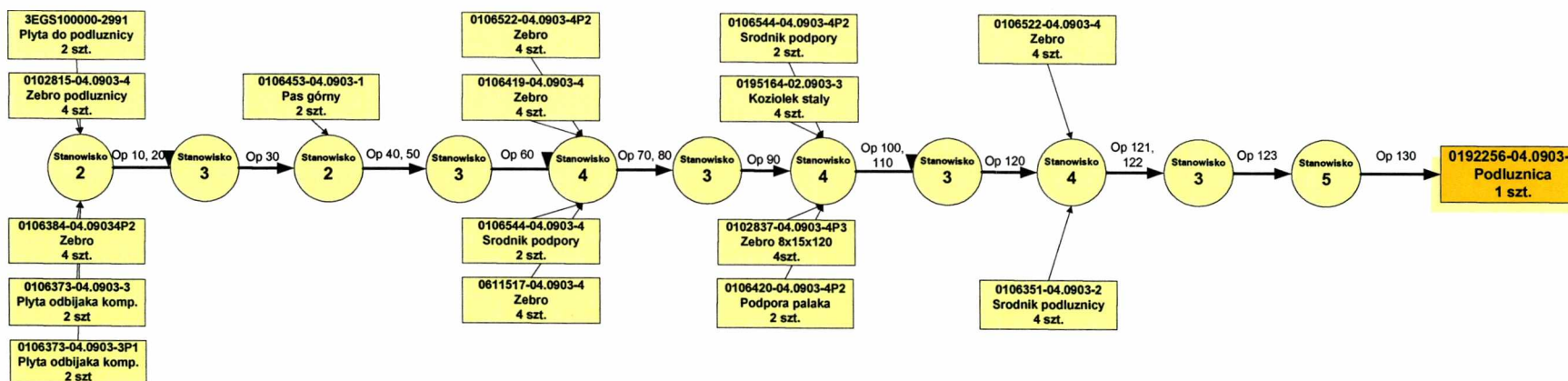
- 2.1. Belka poprzeczna
- 2.2. Podłużnica
- 2.3. Belka bujakowa
- 2.4. Korpus belki bujakowej
- 2.5 Rama wózka

2.1. Belka poprzeczna



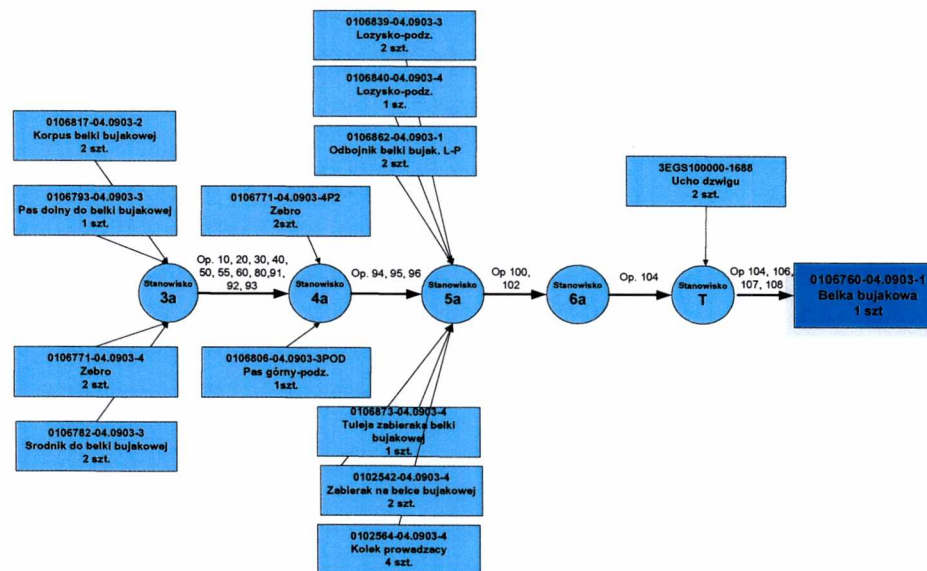
Rys. 91. Struktura produktu i procesu produkcyjnego belki poprzecznej

2.2. Podłużnica



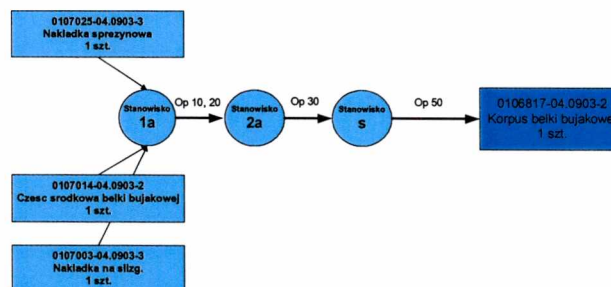
Rys. 92. Struktura produktu i procesu produkcyjnego podłużnicy

2.3. Belka bujakowa



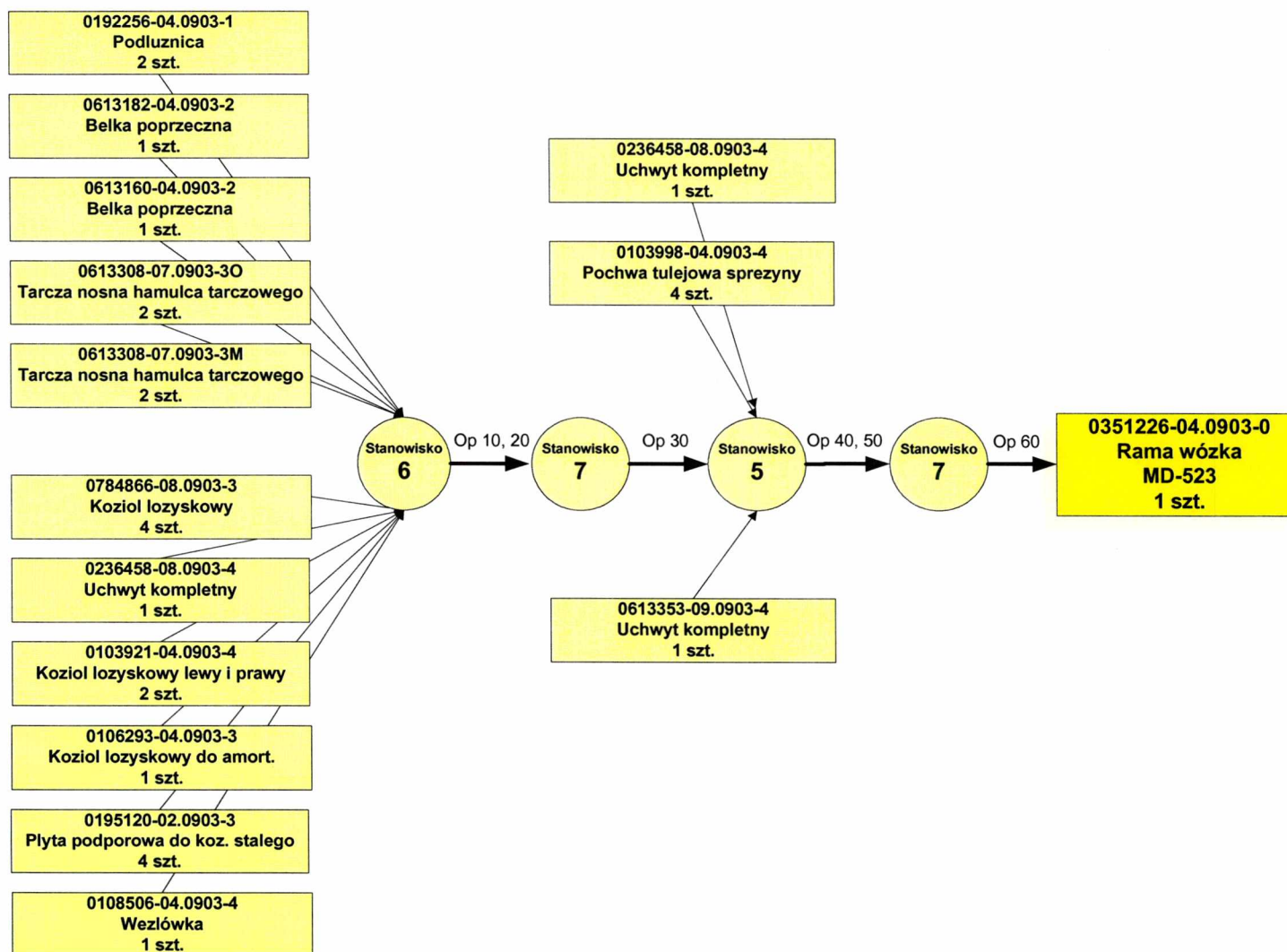
Rys. 93. Struktura produktu i procesu produkcyjnego belki bujakowej

2.4. Korpus belki bujakowej



Rys. 94. Struktura produktu i procesu produkcyjnego korpusu belki bujakowej

2.5. Rama wózka



Rys. 95. Struktura produktu i procesu produkcyjnego ramy wózka MD 523

ZAŁĄCZNIK 3

SŁOWNIK POJĘĆ I TERMINÓW UŻYWANYCH W PRACY

- Badania operacyjne** [13] – zajmują się problematyką analizy, podejmowania decyzji i sterowania złożonymi systemami operacyjnymi, obejmują zatem teorię optymalizacji i decyzji oraz zagadnienia dotyczące realizacji operacji obliczeniowo-decyzyjnych w systemach komputerowych. W szerszym znaczeniu zajmują się problemami kierowania i zarządzania złożonymi systemami utworzonymi z ludzi, maszyn, materiałów i pieniędzy w przemyśle, gospodarce, administracji i obronie,
- cechy statystyczne** (lub **cechy**) [50] – właściwości elementów populacji generalnej,
- cechy mierzalne** [50] – cechy posiadające charakter ilościowy (np. wiek, waga),
- cechy niemierzalne** [50] – cechy posiadające charakter jakościowy (np. płeć, kolor oczu),
- cechy ciągłe** [50] – cechy przyjmujące wartości rzeczywiste, a więc wartości ze zbioru nieprzeliczalnego; jeśli cecha przyjmuje dużo wartości, traktuje się ją jako ciągłą niezależnie od tego, czy z definicji jest ciągła czy skokowa (tzw. cechy quasi-ciągłe),
- cechy skokowe** (lub **dyskretne**) [50] – cechy, które przyjmują skończony lub przeliczalny zbiór wartości na danej skali liczbowej, przy czym najczęściej jest to zbiór liczb całkowitych dodatnich,
- czynnik ryzyka** - czynnik, który pojawia się w systemie w sposób losowy i nie ma możliwości prostej jego eliminacji poprzez zmiany organizacyjne,
- czynnik organizacyjny** - czynnik powodujący zakłócenia w systemie produkcyjnym lecz dający się wyeliminować poprzez proste zmiany organizacyjne,
- dyspersja** – różnica wartości między wartościami uzyskanymi a oczekiwanymi,
- Efektywność ekonomiczna** [65] – wskaźnik systemu produkcyjnego określający iloraz efektu osiągniętego i nakładów poniesionych na jego uzyskanie,
- empiryczny rozkład cechy** [50] – przyporządkowanie uszeregowanym rosnąco wartościom, przyjmowanym przez daną cechę, odpowiednio zdefiniowanych częstości ich występowania,
- Histogram** [50] – zbiór prostokątów, których podstawy wyznaczone są na osi odciętych przez poszczególne przedziały klasowe, natomiast wysokości są wyznaczane na osi rzędnych przez liczebności odpowiadające poszczególnym przedziałom klasowym,
- miernik** [97] – miara określająca wielkość, jakość, wartość,
- model** [35] - odwzorowanie najistotniejszych cech badanego lub projektowanego przedmiotu z punktu widzenia zadania, któremu służy w określonej rzeczywistości lub abstrakcji,

- modelowanie** [43] - działanie polegające na dobieraniu do oryginału możliwego do przyjęcia zamiennika zwanego modelem, czyli jest to przybliżone odtwarzanie najważniejszych właściwości oryginału,
- nieuszkodzalność** [81] - zdolność obiektu do wypełnienia wymaganych funkcji (do poprawnego działania nie przerwanego uszkodzeniem) w danych warunkach w danym przedziale czasu,
- niezawodność** [81] - zdolność obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach i w danej chwili, przy założeniu że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne,
- obiekt** [81] - dowolny prosty lub złożony układ, np. element, przyrząd, system, podsystem, jednostkę funkcjonalną, urządzenie) stanowiący przedmiot rozważania związany z rozwiązywaniem określonego problemu,
- obsługiwalność** [81] - zdolność obiektu do utrzymywania lub odtwarzania, w danych warunkach eksploatacji, stanu w którym może on wypełniać wymagane funkcje przy założeniu, że obsługa jest wykonywana w przyjętych warunkach z zachowaniem ustalonych procedur i środków,
- obszar krytyczny** [50] – obszar odrzucenia hipotezy,
- parametr** [97] – wielkość charakterystyczna dla danego procesu lub urządzenia,
- populacja generalna** (lub **zbiorowość generalna** lub **populacja**) [50] – zbiorowość statystyczna, na której prowadzone są badania statystyczne. Jej elementami są obiekty materialne lub zjawiska mające przynajmniej jedną wspólną wyróżniającą je właściwość,
- prawdopodobieństwo a posteriori** [76] – uaktualnione prawdopodobieństwo a priori, zmodyfikowane na podstawie nowych informacji,
- prawdopodobieństwo a priori** [76] – prawdopodobieństwo przyporządkowane pewnemu zdarzeniu w jakimś szczególnym momencie czasu,
- proces produkcyjny** [71, 72] - uporządkowany zbiór działań (operacji, czynności) mających na celu wykonanie produktu (wyrobu lub usługi),
- produktywność** [71] – wskaźnik systemów produkcyjnych określający stosunek wektorów wyjścia do wektorów wejścia, czyli stosunek wyników działań produkcyjnych do zużytych na ten cel nakładów,
- próba** [50] – podzbiór elementów populacji podlegających badaniu,
- przedsięwzięcie** [68] - zorganizowane działanie ludzkie, zmierzające do osiągnięcia określonego celu, zawarte w skończonym przedziale czasu – z wyróżnionym

początkiem i końcem – oraz realizowane przez skończona liczbę osób, środków technicznych, energii, środków finansowych i informacji,

przedział klasowy [105] – tworzony jest dzięki określeniu rozkładu cechy ciągłej poprzez przyporządkowanie liczebności (częstości) odpowiednim przedziałom wartości cechy, a nie konkretnym jej wartością,

rozkład a posteriori [50] – skorygowany o rozkład a priori o dodatkowe informacje z próby,

rozkład a priori [50] – przyjęty rozkład prawdopodobieństwa poszczególnych stanów natury na początku analizy decyzyjnej i przed doświadczeniem,

rozkład cechy [50] – różnice między wartościami rozpatrywanej cechy lub cech w populacji,

rozpiętość przedziału klasowego [82] – różnica pomiędzy górną i dolną granicą i – tego przedziału klasowego,

semiwariancja [92] – odpowiednik wariancji uwzględniający jedynie ujemne odchylenia zmiennej od wartości średniej lub oczekiwanej,

skuteczność [98] – wskaźnik systemu produkcyjnego określający stopień osiągnięcia przez system założonego celu,

sprawność [98] – wskaźnik systemu produkcyjnego określający stosunek aktualnej wielkości produkcji do wielkości możliwej do osiągnięcia,

standardowy rozkład normalny [50] – rozkład normalny ze średnią $m = 0$ oraz odchyleniem standardowym $\sigma = 1$,

stan natury [50] – czynnik, który nie jest kontrolowany przez podejmującego decyzję, a który wpływa na rezultat (wynik) podejmowania decyzji,

stanowisko robocze [71] – najmniejsza (niepodzielna) komórka produkcyjna. Stanowisko robocze określa się jako komórkę produkcyjną stopnia zerowego – KP^0 ,

struktura produkcyjna [12] – układ komórek produkcyjnych oraz zespół związków kooperacyjnych zachodzących między nimi,

struktura równoległa systemów produkcyjnych [75] – struktura niezawodnościowa, w której ryzyko zawodności jednego elementu zwiększa ryzyko całkowite układu o wartość ryzyka tego elementu,

struktura równoległa w ujęciu klasycznej teorii niezawodności [75] – struktura niezawodnościowa systemu do działania którego wymagane jest działanie przynajmniej jednego obiektu/ podsystemu,

struktura szeregową [75] – struktura niezawodnościowa systemu do działania którego wymagane jest działanie wszystkich obiektów/ podsystemów,

struktura szeregowo – równoległa [75] – mieszanina niezawodnościowej struktury szeregowej i równoległej,

symulacja [35] - technika służąca do dokonywania eksperymentów na pewnych rodzajach modeli, które opisują zachowanie się złożonych systemów w pewnych okresach czasów,

symulacja ciągła [44] - zmiany następują ciągle w odniesieniu do czasu, jeżeli wartości przyjmowane przez zmienne opisowe mogą być przedstawione za pomocą liczb rzeczywistych lub ich przedziałów,

symulacja deterministyczna [44] - przebieg eksperymentu symulacyjnego nie podlega prawdopodobieństwu, ma przewidywalne wejścia i daje przewidywalne wyniki,

symulacja dyskretna [44] - symulacja, w której zmiany pojawiają się w określonych punktach czasu, zmiany w modelu pojawiają się w momencie wystąpienia pewnych zdarzeń,

symulacja stochastyczna [44] - opiera się na procesach stochastycznych, to znaczy takich, które zbudowane są z sekwencji losowej z generowanych wartości,

system (w ujęciu teorii systemów) [13] – jest pewną całością, w której współdziałają wyodrębnione części składowe. Funkcjonowanie systemu zależy od funkcji części składowych i związków między nimi. Powiązania części składowych określają strukturę systemu. O systemach mówimy tylko wtedy, gdy całość została zorganizowana i ma realizować określony cel, rozłożony na podcele dla poszczególnych części,

system produkcyjny [12, 72] - układ wzajemnie powiązanych ze sobą zasobów materialnych, energetycznych, kadrowych, kapitałowych i informacyjnych. Jest on celowo zaprojektowany i zorganizowany tak by zaspokajać potrzeby klientów,

szereg statystyczny [82] – ciąg wielkości statystycznych uporządkowanych według określonych kryteriów,

szereg szczegółowy [82] – uporządkowany ciąg wartości badanej cechy statystycznej.

szereg rozdzielnicy [82] – zbiorowość statystyczna podzielona na części (klasy) według określonej cechy jakościowej lub ilościowej, z podaniem liczebności każdej z wyodrębnionych klas; charakteryzują one strukturę danej zbiorowości stąd często nazywane są szeregami strukturalnymi,

Szereg strukturalny – patrz szereg rozdzielnicy,

średnia arytmetyczna ($\bar{x}$) [50] – jest to suma wartości cechy w całym zbiorze podzielona przez liczebność tego zbioru,

teoria niezawodności [75] – dziedzina nauki stosowanej, zajmująca się badaniem i projektowaniem obiektów (elementów, systemów) z punktu widzenia spełniania przez nie zadanych wymagań (w ciągu danego czasu, w określonych warunkach,

teoria (technika) systemów [13] – zwana inaczej również inżynierią systemów lub systemotechniką, jest dziedziną zajmującą się teoretycznymi i technicznymi problemami modelowania, identyfikacji, analizy i projektowania oraz sterowania w odniesieniu do systemów o różnej naturze; obejmuje w szczególności teorię i technikę podejmowania decyzji, teorię i technikę optymalizacji,

trwałość [81] – czas, który upływa od rozpoczęcia do zakończenia eksploatacji obiektu,

wariancja [50] – statystyczna miara dyspersji; określa stopień rozrzutu wartości cechy lub zmiennej losowej wokół wartości średniej lub oczekiwanej,

wartość oczekiwana [50] – odpowiednik średniej arytmetycznej; charakteryzuje przeciętną wartość przyjmowaną przez zmienną losową,

wskaźnik [97] – liczba wyrażająca procentowy stosunek wielkości rozpatrywanej do przyjmowanej podstawy,

współczynnik asymetrii [105] – miara symetrii rozkładu cechy lub zmiennej losowej,

współczynnik zmienności [50] – miara zróżnicowania względnego cechy lub zmiennej losowej,

zarządzanie [13] – nauka o zarządzaniu w węższym zakresie obejmuje zagadnienia podejmowania decyzji i sterowania obiektami, w których realizowane są złożone czynności z udziałem ludzi. Najczęściej są to procesy gospodarowania i cel sterowania uwzględnia wskaźniki ekonomiczne. W szerszym znaczeniu obejmuje całokształt problematyki związanej z kierowaniem złożonymi przedsięwzięciami,

zdarzenie elementarne [50] – wyniki odpowiadające rozpatrywanemu doświadczeniu losowemu (np. rzut kostką),

zdarzenie losowe [50] – zdarzenie, którego rezultatu nie można przewidzieć, pomimo sprecyzowania warunków w jakich to zdarzenie zachodzi,

zmienna celu [50] – zmienna odzwierciedlająca cel działania, dla którego osiągnięcia poszukuje się rozwiązania problemu decyzyjnego i najlepszej decyzji,

zmienna losowa [50] – cecha zdarzenia losowego, wyrażona we właściwych jednostkach ilościowych,