

Anna Burduk

**MODELOWANIE SYSTEMÓW
NARZĘDZIEM OCENY STABILNOŚCI
PROCESÓW PRODUKCYJNYCH**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013

Recenzenci
Zbigniew BANASZAK
Bożena SKOŁUD

Opracowanie redakcyjne i korekta
Hanna JUREK

Projekt okładki
Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-795-5

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 742/2013.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	5
1. Wprowadzenie	7
1.1. Tendencje rozwojowe współczesnych systemów produkcyjnych	7
1.2. Rola modeli produktów i procesów w zapewnieniu stabilności systemów produkcyjnych	9
1.3. Definicja stabilności systemów produkcyjnych	12
1.4. Cel i struktura monografii	15
2. Charakterystyka współczesnych systemów produkcyjnych	21
2.1. Rola i znaczenie innowacji we współczesnych systemach produkcyjnych	23
2.2. Budowa, cechy i analiza współczesnych systemów produkcyjnych	25
2.3. Techniczne i organizacyjne przygotowanie produkcji	32
2.3.1. Systemy informatyczne w zarządzaniu procesami produkcyjnymi	37
2.4. Sterowanie systemem produkcyjnym	40
2.4.1. Systemy pchające	42
2.4.2. Systemy ssące	43
2.4.3. Systemy wyciskające	44
2.5. Zastosowanie kart kontrolnych w sterowaniu procesami produkcyjnymi	45
2.6. Wnioski	47
3. Modelowanie systemów produkcyjnych	49
3.1. Modele schematyczne systemów produkcyjnych	54
3.1.1. Schematy blokowe	55
Przykład 1. Schemat blokowy opracowywania struktury produktu przed i po wprowadzeniu elektronicznego obiegu informacji	55
3.1.2. Mapy procesów	56
Przykład 2. Mapa VSM dla procesu produkcyjnego lampki sygnalizacyjnej	57
3.1.3. Modele procesów zapisane w notacjach procesów biznesowych	60
3.1.3.1. Notacja IDEF0	61
Przykład 3. Model procesu produkcji odlewów korpusu zacisku hamulcowego zapisany w notacji IDEF0	62
3.1.3.2. Notacja BPMN	63
Przykład 4. Model procesu ładowania i odstawy rudy miedzi zapisany w notacji BPMN	64
3.2. Modele symulacyjne systemów produkcyjnych	65
3.2.1. Ogólna charakterystyka modeli symulacyjnych	65
3.2.2. Sposób budowy modeli symulacyjnych	69
3.2.3. Kryteria wyboru pakietu symulacyjnego	75

Przykład 5. Zastosowanie modelowania i symulacji w reorganizacji linii produkcyjnej wiązek elektrycznych	78
Przykład 6. Zastosowanie modelowania i symulacji w reorganizacji zakładu produkującego ramy wózków	87
3.3. Wnioski i porównanie prezentowanych metod modelowania	91
4. Zapewnienie stabilności systemów produkcyjnych przez ocenę i eliminację ryzyka	95
4.1. Charakterystyka pojęcia ryzyka i metody jego oceny	96
4.2. Ocena ryzyka procesów produkcyjnych za pomocą analizy FMEA	99
4.3. Niezawodność w ocenie ryzyka systemów produkcyjnych	103
4.4. Struktura niezawodnościowa systemów	104
4.4.1. Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze szeregowej	105
4.4.2. Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o strukturze równoległej	107
4.4.3. Metoda wyznaczania wielkości ryzyka dla systemów o produkcyjnej strukturze szeregowo-równoległej	110
4.4.4. Uwzględnienie współczynnika wagowego i akceptowalność ryzyka	112
Przykład 7. Zapewnienie stabilności reorganizowanego systemu produkcyjnego wiązek elektrycznych przez ocenę ryzyka	114
4.5. Wnioski	122
5. Zastosowanie sieci neuronowych w modelowaniu procesów produkcyjnych	125
5.1. Opis sposobu funkcjonowania sieci neuronowych	126
5.2. Historia sieci neuronowych	129
5.3. Ogólna klasyfikacja sieci neuronowych	131
5.3.1. Sieci jedno- i wielowarstwowe	131
5.3.2. Sieci jednokierunkowe i rekurencyjne	132
5.3.3. Klasyfikacja sieci ze względu na sposób uczenia	133
5.4. Zastosowanie, zalety i wady sztucznych sieci neuronowych	134
Przykład 8. Zastosowanie modelu SSN w zapewnieniu stabilności systemu produkcji wiązek elektrycznych	136
Przykład 9. Zastosowanie modelu SSN w zapewnieniu stabilności procesu wydobyczego rudy miedzi	141
5.5. Wnioski	152
6. Model hybrydowy systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonych celów produkcyjnych	155
6.1. Wprowadzenie do rozmytych systemów ekspertowych	156
6.2. Budowa modelu systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji planu produkcji w zależności od wielkości ryzyka i poziomu stabilności systemu produkcyjnego	158
Przykład 10. Budowa modelu hybrydowego systemu ekspertowego do oceny możliwości produkcji założonej liczby wiązek elektrycznych	159
6.3. Wnioski	165
7. Podsumowanie	167
Literatura	171
Streszczenie w języku angielskim	181

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- b* – założona wartość progu aktywacji w modelu sztucznego neuronu,
- BPMN – graficzna notacja modelowania procesów biznesowych (ang. *Business Process Modelling Notation*),
- CAD – komputerowo wspomagane projektowanie (ang. *Computer Aided Design*),
- CAE – komputerowo wspomaganie prac inżynierskich (ang. *Computer Aided Engineering*),
- CAM – komputerowo wspomagane wytwarzanie (ang. *Computer Aided Manufacturing*),
- CAP – komputerowo wspomagane planowanie (ang. *Computer Aided Planning*),
- CAPP – komputerowo wspomagane planowanie procesów (ang. *Computer Aided Process Planning*),
- CAQ – komputerowo wspomagane sterowanie jakością (ang. *Computer Aided Quality Control*),
- CAX – metody i techniki komputerowe służące automatyzacji komputerowej prac inżynierskich w przedsiębiorstwach przemysłowych,
- CE – inżynieria współbieżna (ang. *Concurrent Engineering*),
- CIM – komputerowo zintegrowane wytwarzanie (ang. *Computer Integrated Manufacturing*),
- CRM – System informatyczny do zarządzania relacjami z klientami (ang. *Customer Relationship Management*),
- DFD – diagram przepływu danych (ang. *Data Flow Diagram*),
- ERP – system informatyczny do zarządzania przedsiębiorstwem (ang. *Enterprise Resources Planning*),
- ε – wartość błędu w procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej,
- FMEA – metoda oceny ryzyka procesu lub produktu zwana analizą przyczyn i skutków wad (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*),
- IDEF – grupa metod modelowania i projektowania graficznego stosowana w komputerowo wspomaganym inżynierii biznesu (ang. *Integration Definition*),
- IDEF0 – metoda modelowania graficznego, należąca do rodziny metod IDEF, będąca graficznym przedstawieniem funkcji, działań, czynności zachodzących w przedsiębiorstwie lub w innym systemie (ang. *Integration Definition for Function Modelling*),
- JiT – metoda lub strategia zarządzania zapasami dokładnie na czas (ang. *Just in Time*),
- KC – koszt całkowity,
- KPⁿ – oznaczenie poziomu w strukturze produkcyjno-organizacyjnej,
- L – liczba warstw w sztucznej sieci neuronowej,
- LP – koncepcja szczupłego zarządzania systemem produkcyjnym (ang. *Lean Production*),
- MES – system informatyczny do zarządzania realizacją produkcji (ang. *Manufacturing Execution System*),
- MRP I – metoda lub system informatyczny do planowania potrzeb materiałowych (ang. *Material Requirements Planning*),
- MRP II – system informatyczny do zarządzania produkcją/przedsiębiorstwem (ang. *Manufacturing Resources Planning*),
- N – niezawodność obiektu, procesu lub systemu,

- N_k – liczba neuronów w warstwie k -tej ($k = 1, \dots, L$) sztucznej sieci neuronowej,
 O_i – obszary zdekomponowanego systemu w planowaniu i ocenie ryzyka,
 OPP – organizacyjne przygotowanie produkcji,
 OS – obiekt sterowania,
 P – produktywność systemu produkcyjnego,
 PDM – system informatyczny do zarządzania cyklem życia produktu (ang. *Product Data Management*),
 PLM – system informatyczny do zarządzania cyklem życia produktu (ang. *Product Lifecycle Management*),
 PPC – komputerowo wspomagane zarządzanie produkcją (ang. *Production Planning and Control*),
 RPN – liczba priorytetów ryzyka wyznaczana jako wartość w analizie FMEA (ang. *Risk Priority Number*),
 R_C – całkowite ryzyko systemu,
 R_e – relacje pomiędzy elementami systemu, zbiór relacji,
 R_i – ryzyko i -tego obszaru zdekomponowanego systemu,
 r_i – czynnik ryzyka występujący w i -tym obszarze systemu produkcyjnego,
 S_i – strata na analizowanym wskaźniku w i -tym obszarze systemu,
 SCM – system informatyczny do zarządzania łańcuchem dostaw (ang. *Supply Chain Management*),
 SPC – statystycznym sterowaniu procesem (ang. *Statistical Process Control*),
 SSN – sztuczne sieci neuronowe,
 STEP – norma modelowania produktów i procesów definiująca reguły zapisu i wymiany danych modelu produktu oparte na danych geometrycznych, topologicznych, technologicznych, materiałowych i innych (ang. *Standard for the Exchange of Product Model Data*),
 T – okres reprezentatywny będący przyjętą jednostką czasu, dla którego wyznaczono osiągnięcie celu przez system produkcyjny,
 TA – transformacja, proces przetwarzania w systemie powodujący przekształcenie wejść do systemu w wyjścia,
 TPP – techniczne przygotowanie produkcji,
 US – obiekt sterujący, urządzenie sterujące,
 $\mathbf{W}_i^{(k)}$ – wektor wag i -tego neuronu z warstwy k -tej sztucznej sieci neuronowej,
 $x_i^{(k)}$ – sygnał wejściowy i -tego neuronu w k -tej warstwie ($i = 0, \dots, N_{k-1}; k = 1, \dots, L$),
 VSM – mapowanie strumienia wartości (ang. *Value Stream Mapping*),
 w – wydajność systemu produkcyjnego,
 W_{pl} – wielkość planowana analizowanego wskaźnika charakterystycznego dla analizowanego systemu produkcyjnego,
 W_{rzecz} – wielkość rzeczywista analizowanego wskaźnika charakterystycznego dla analizowanego systemu produkcyjnego,
 W_{teoret} – możliwa do uzyskania wartość teoretyczna wskaźnika charakteryzującego system, wyrażona mierzalnym lub ilościowym wskaźnikiem,
 W_{teoret}^i – możliwa do uzyskania wartość teoretyczna wskaźnika charakteryzującego i -ty obszar zdekomponowanego systemu produkcyjnego, wyrażona mierzalnym lub ilościowym wskaźnikiem,
 X – wejścia do systemu produkcyjnego lub zmienna losowa,
 Y – wyjścia z systemu produkcyjnego,
 Z – zakłócenia, czynniki pojawiające się w systemie produkcyjnym w sposób losowy i wpływające na jego funkcjonowanie,
 ZSI – zintegrowany system informatyczny (ang. *Integrated Management System*),
 Δt_i – straty czasu w i -tych obszarach zdekomponowanego systemu spowodowane występowaniem czynników ryzyka.

1. WPROWADZENIE

Współcześnie, przy dużej konkurencji na globalnym rynku, rosną wymagania klientów co do wysokiej jakości, krótkiego czasu dostarczania nowych lub ulepszonych produktów na rynek oraz ich niskich cen. Takie wymagania rynku powodują potrzebę równoległej pracy całych załóg zakładów z różnych szczebli organizacyjnych, od inżynierów i menedżerów do szeregowych pracowników. Ten nowy rodzaj pracy wymaga korzystania z cyfrowego środowiska zintegrowanych systemów i narzędzi informatycznych oraz posługiwania się cyfrowymi modelami produktów, procesów wytwórczych oraz całych systemów produkcyjnych. Jedynie cyfrowe modele, będące uproszczonym odzwierciedleniem rzeczywistości oraz środowisko komputerowe, umożliwią równoległą pracę wielu zespołów pracowników z różnych szczebli organizacyjnych i alokacji. Modele cechuje krótki czas budowy, możliwość zasilenia danymi i testowania planowanych rozwiązań bez zaburzeń stabilności funkcjonowania rzeczywistego systemu lub obiektu. Na ich podstawie można weryfikować skutki decyzji oraz oceniać warianty planowanych rozwiązań. W literaturze i w praktyce gospodarczej proponuje się różne metody modelowania systemów produkcyjnych. Jednak daje się zauważyć brak integracji między poszczególnymi rodzajami modeli. Opracowanie metody, która umożliwi fuzję najczęściej wykorzystywanych typów modeli systemów produkcyjnych, umożliwi szybszą ocenę możliwości osiągnięcia założonych celów przez reorganizowany bądź optymalizowany system.

1.1. TENDENCJE ROZWOJOWE WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

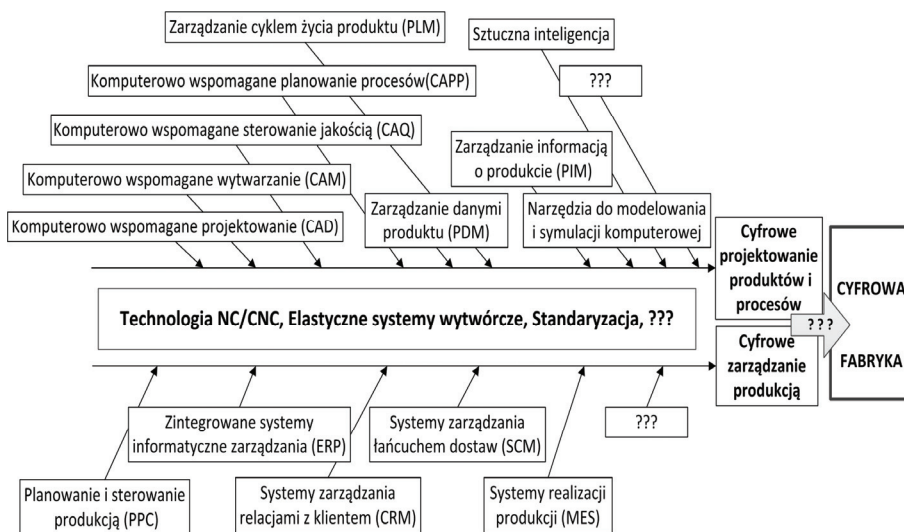
Globalizacja gospodarcza, która postępuje począwszy od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, powoduje coraz to ostrzejsze warunki konkurencji na rynku dóbr i usług. O uzyskaniu przewagi konkurencyjnej decyduje dziś nie tylko cena i jakość produktu, lecz przede wszystkim jego innowacyjność, liczba funkcji użytkowych oraz różnorodność

przejawiająca się występowaniem wielu wersji i wariantów tego samego produktu. Dostrzegając te tendencje producenci coraz częściej ulepszają i rozwijają swoje produkty będące w fazie wzrostowej na rynku. Niektórzy producenci wręcz „kreują wartość produktu”, czyli wyposażają go w różnorodne funkcje użytkowe, o których klient dowiaduje się dopiero w momencie zakupu, porównując produkty różnych producentów. Wszystko to powoduje skrócenie cyklu życia produktu, a o uzyskaniu przewagi konkurencyjnej coraz częściej decyduje czas dostarczenia innowacyjnego produktu na rynek.

Aby móc sprostać tym wymaganiom rynku, zmianie uległo zarówno podejście do zarządzania przedsiębiorstwem, jak i do wytwarzania. Współczesne przedsiębiorstwa oprócz podejścia procesowego, koncentracji na potrzebach i wartości dla klienta, muszą również, tworząc warunki do wprowadzania innowacji, kierować się ideą szczupłego wytwarzania (ang. *Lean Manufacturing*) oraz być elastyczne i zdolne do reagowania na zmienność warunków otoczenia (ang. *Agile Manufacturing*). Ponadto niezbędna jest ciągła optymalizacja procesów w przedsiębiorstwie, integracja organizacji, ludzi i technologii oraz zarządzanie wiedzą.

Pojawiające się na rynku nowe lub ulepszone produkty powodują, że skróceniu uległa jedna z ostatnich faz cyklu życia produktu, czyli użytkowanie. Przedsiębiorstwa, chcąc przyspieszyć czas dostarczenia nowego lub ulepszanego produktu na rynek, koncentrują się na skróceniu faz projektowania produktu i procesu wytwórczego. W fazie technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji bierze udział wiele obszarów funkcjonalnych przedsiębiorstwa takich, jak: konstrukcja, technologia, jakość, marketing, logistyka, serwis, a także często klienci i dostawcy. Coraz więcej produktów jest wytwarzanych w warunkach integracji międzynarodowej. Potrzeba dużej liczby danych o nowych lub rozwijanych produktach i procesach oraz dostępu do nich z różnych miejsc świata, wymaga budowy cyfrowych środowisk, w których równolegle następuje projektowanie produktu oraz planowanie procesów wytwórczych, logistycznych i innych (ang. *Concurrent Engineering*). Coraz częściej w literaturze przedmiotu pojawiają się pojęcia cyfrowej inżynierii produktu (ang. *Digital Product Engineering*), cyfrowej inżynierii wytwarzania (ang. *Digital Manufacturing Engineering*) lub cyfrowej fabryki (ang. *Digital Factory*). Zastosowanie cyfrowej technologii w planowaniu procesów wytwarzania może być realizowane równolegle do projektowania produktu, skracając czas potrzebny do przygotowania wytwarzania, redukując koszty projektowania i produkcji [107]. Na rysunku 1 przedstawiono wybrane narzędzia informatyczne stosowane powszechnie przez przedsiębiorstwa w technicznym i organizacyjnym przygotowaniu produkcji oraz w zarządzaniu systemami produkcyjnymi.

Innowacje produktowe i procesowe niosą ze sobą zmiany, które zaburzają funkcjonowanie systemu produkcyjnego i mogą powodować utratę jego stabilności. Aby uzyskać efekty takie, jak szybkie opracowanie i wdrażanie innowacji, z jednoczesnym zachowaniem stabilności systemu produkcyjnego, konieczne jest wykorzystywanie cyfrowych modeli zarówno w zakresie technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji, jak



Rys. 1. Wybrane narzędzia informatyczne w przygotowaniu i zarządzaniu produkcją

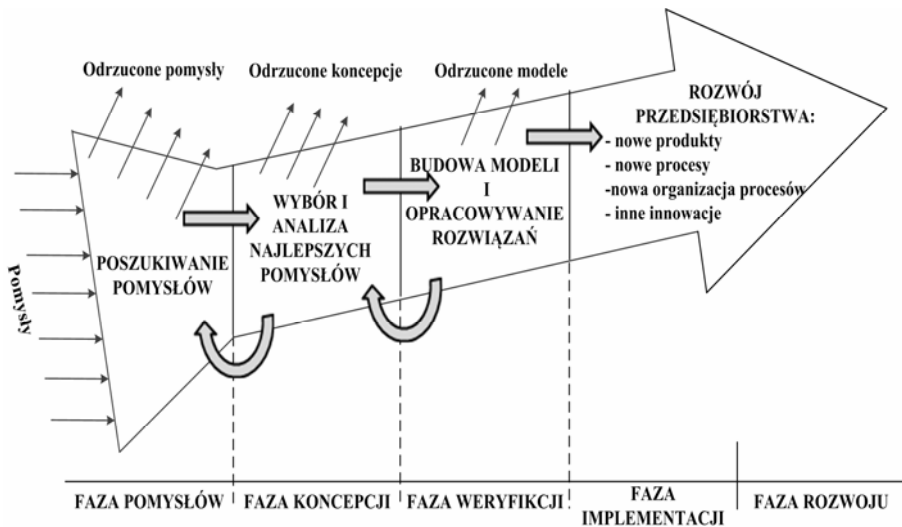
i w zarządzaniu systemem produkcyjnym. W każdym dobrze prosperującym przedsiębiorstwie następują ustabilizowane procesy, które poddawane są optymalizacji ze względu na różne kryteria optymalizacyjne. Z drugiej strony zmienne i dynamiczne otoczenie przedsiębiorstw w sposób ciągły generuje zmiany, na które przedsiębiorstwo musi reagować. Jeśli przedsiębiorstwo nie potrafi ich wykorzystać do potencjalnego rozwoju lub nie potrafi przewidzieć ich rezultatów, może stracić swoją pozycję na rynku.

Z tego powodu coraz ważniejsze staje się rozróżnienie pomiędzy zarządzaniem skupiającym się na utrzymaniu stabilności systemu produkcyjnego oraz działaniami rozwojowymi, czyli wdrażaniem innowacji produktowych i procesowych. Obydwa typy tych działań powinny być prowadzone niezależnie, lecz równoległe. Z jednej strony zarządzanie przedsiębiorstwem produkcyjnym powinno koncentrować się na zapewnieniu stabilności systemu produkcyjnego w osiąganiu założonych wyników, a z drugiej na szybkim i efektywnym wprowadzaniu innowacji zapewniających rozwój przedsiębiorstwa.

1.2. ROLA MODELI PRODUKTÓW I PROCESÓW W ZAPEWNIENIU STABILNOŚCI SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Podejmowane decyzje opierają się na celach o różnych horyzontach planowania. Model jest uproszczonym odwzorowaniem rzeczywistości; stanowi podstawowe źródło wiedzy o modelowanym obiekcie i wpływie na niego planowanych rozwiązań. Na

podstawie modelu można wyjaśnić sposób działania i funkcjonowania obiektu lub systemu w określonych warunkach, a prowadzone na nim badania nie powodują zaburzeń stabilności funkcjonowania w obiekcie lub systemie rzeczywistym. Daje to możliwość weryfikacji skutków planowanych decyzji zarówno odnoszących się do bieżącej działalności przedsiębiorstwa, jak i jego przyszłości. Z badań wynika, że fazy projektowania i technicznego przygotowania produkcji przypisuje się aż 70–80% wpływu na koszty ponoszone na wszystkich etapach realizacji produkcji [63, 107, 187]. Podstawowe etapy procesu innowacji przedstawiono na rysunku 2.

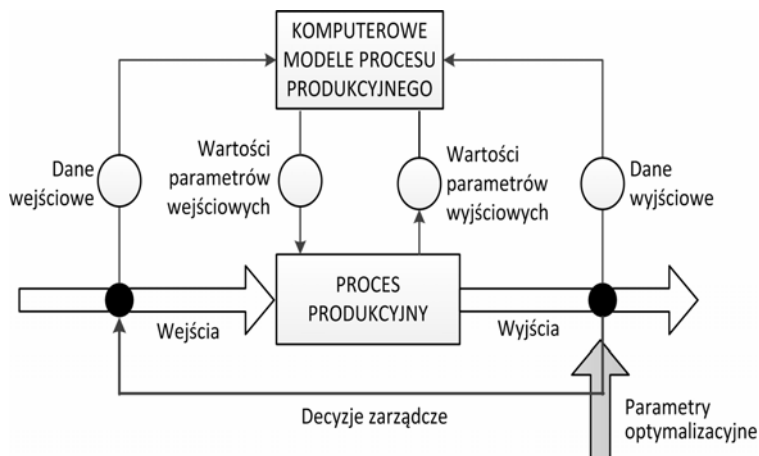


Rys. 2. Podstawowe etapy w procesie innowacji

Na przydatność modeli wpływa ich dokładność, możliwość zasilenia wiarygodnymi danymi oraz krótki czas ich powstania. Jest to możliwe dzięki postępującej unifikacji, normalizacji, standaryzacji i parametryzacji procesów produkcyjnych i produktów. Standaryzacja, oprócz skrócenia czasu budowy modelu, znacznie również zmniejsza koszty rozwoju wyrobu lub procesu produkcyjnego.

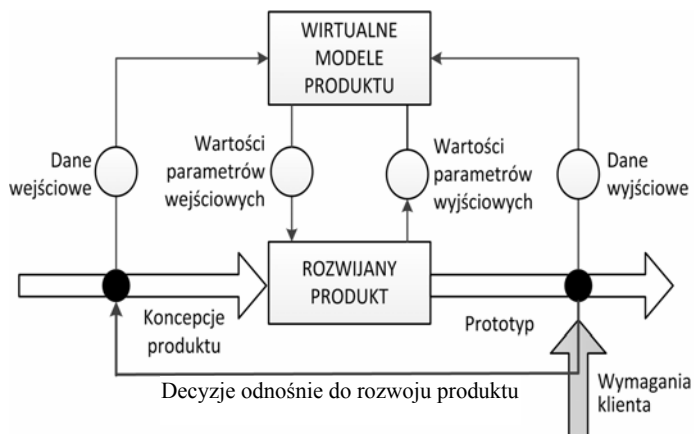
Dzięki zastosowaniu systemów informatycznych modele można zasilić odpowiednimi danymi pochodzącymi z systemu rzeczywistego. Współczesne systemy produkcyjne są w coraz to większym stopniu opomiarowane i monitorowane. Codziennie wiele danych organizacyjnych, technologicznych, kosztowych i innych jest zapisywana w bazach danych systemów informatycznych. Problemem współczesnych przedsiębiorstw staje się nie brak danych, lecz ich nadmiar. Często problem ten sprowadza się do odpowiedniego pozyskania danych, przetworzenia i wygenerowania modelu. Przeprowadzane eksperymenty na modelach nie zaburzają funkcjonowania systemu rzeczywistego, przez co ułatwiają przewidzieć skutki i wybrać optymalny wariant decyzyjny odnośnie do wielkości i rodza-

jów wejść do systemu. Na rysunku 3 przedstawiono schematyczny sposób zarządzania systemem produkcyjnym z wykorzystaniem modelu komputerowego.



Rys. 3. Sposób zarządzania i optymalizacji procesu produkcyjnego z wykorzystaniem modelu komputerowego

W podobny sposób wirtualne modele produktów umożliwiają rozwój produktu zgodnie z wymaganiami klientów. Koncepcje produktu mogą być weryfikowane pod kątem wymagań klientów na modelach zawierających różne wartości parametrów jakościowych, kosztowych, materiałowych, funkcjonalnych i wielu innych. Na rysunku 4 przedstawiono uproszczony sposób rozwoju produktu, opierając się na jego modelach wirtualnych.



Rys. 4. Rozwój produktu według modelu wirtualnego

Motorem rozwoju współczesnych przedsiębiorstw są innowacje i zróżnicowane wyroby, a w zarządzaniu, wytwarzaniu i projektowaniu nowych produktów postępująca integracja zadań i funkcji w wielu, kiedyś odrębnych, obszarach przedsiębiorstwa. Tutaj pojawia się problem zapewnienia stabilności produkcji. Produkcję w małych seriach produkcyjnych, dużym zróżnicowaniu wyrobów i przy niskich poziomach zapasów cechuje znacznie mniejsza stabilność niż produkcję wielkoseryjną. Dodatkowo wprowadzane innowacje w produktach czy procesach skutkują zaburzeniami w bieżącej działalności. Choć zaburzenia te najczęściej mają charakter krótkotrwały, to mogą doprowadzić do utraty stabilności funkcjonowania lub wytwarzania w przedsiębiorstwie, co z kolei przekłada się na straty finansowe i utratę rynku.

1.3. DEFINICJA STABILNOŚCI SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Pojęcie stabilności wywodzi się z teorii systemów. W literaturze spotyka się kilka różnych definicji stabilności systemu. Większość z nich odwołuje się do pojęcia punktu/stanu równowagi i definiuje stabilność systemu jako jego zdolność powracania do stanu równowagi po ustaniu zaburzeń, które go z niego wytrąciły. Stabilność systemu sterowania jest najważniejszą jego cechą charakteryzującą zdolność do wykonywania zadań, dla których został on zbudowany. Ocena stabilności systemu jest typowym zadaniem analizy jakościowej [23]. Stabilność, rozumiana bardzo szeroko, oznacza stałość (niezmiennność w czasie) jakiejś cechy lub pewnego ciągu stanów, przez które przechodzi system [189] lub stopień odporności systemu na zakłócenia wewnętrzne lub zewnętrzne [24].

Równowaga to stan systemu spełniającego określone warunki. Pojęcie to wywodzi się z mechaniki klasycznej, a dokładniej z położenia równowagi ciała sztywnego. Teoria systemów przez równowagę rozumie stan systemu pozostający niezmienny w wyniku transformacji. Inaczej mówiąc, równowaga oznacza, że żadna ze zmiennych systemu nie zmienia wartości z upływem czasu [92]. W kategoriach funkcjonowania systemów produkcyjnych równowaga może oznaczać, że wielkości wejść i wyjść spełniają równania równowagi [128]. Część wejść i wyjść może w danej chwili nie spełniać warunków równowagi. System stabilny powinien tę niezgodność po pewnym czasie usunąć, powracając do stanu równowagi. System znajdujący się w danym okresie poza obszarem stabilności generuje dalsze wzmocnienia niezgodności między wejściami i wyjściami.

Stan systemu określany jest niejednakowo w różnych dziedzinach techniki. W automatyce stan systemu (obiektu, układu) rozumiany jest jako najmniejszy zbiór wielkości (zmiennych), których znajomość w danym momencie umożliwia określenie przyszłych przebiegów czasowych zmiennych wyjściowych obiektu [151]. W eksplo-

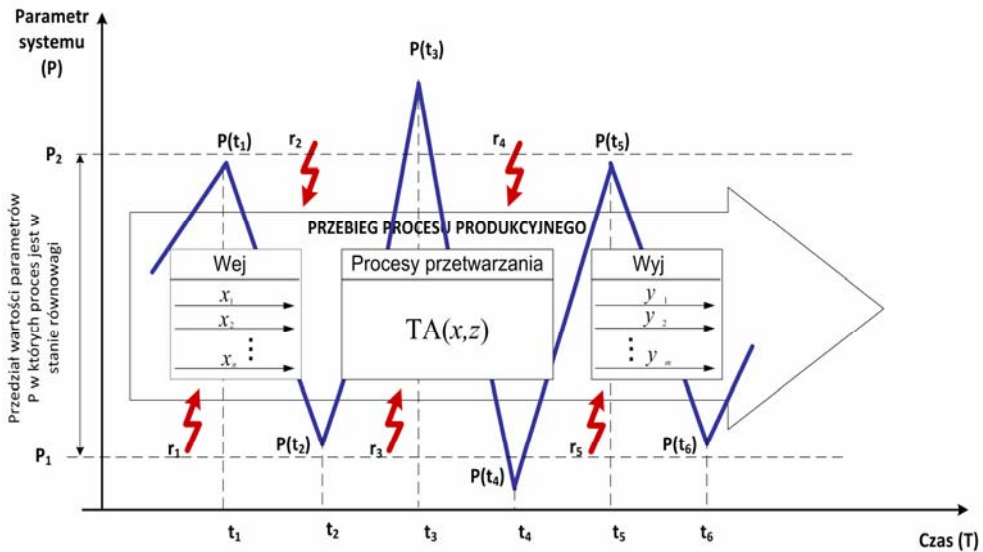
atacji maszyn przyjmuje się, że stan modelu maszyny opisany jest zbiorem chwilowych wartości określających ją parametrów [217]. Stanem systemu technicznego określa się zbiór wartości wszystkich parametrów określających system w danej chwili t . W ujęciu diagnostycznym jest to zbiór cech stanu oraz parametrów diagnostycznych w danej chwili, istotnych dla jednoznacznego określenia stanu systemu.

Rozpatrywane cechy lub parametry, warunkujące poprawność działania systemu, analizuje się w kontekście poprawności działania, osiągania założonych wyników lub spełniania założonych norm. Prowadzi to do rozróżniania różnych rodzajów stanów (eksploatacyjnych, funkcjonalnych, niezawodnościowych i in.). Każdy system znajduje się w pewnym stanie, a ponieważ systemy produkcyjne mają charakter dynamiczny, to w sposób ciągły zachodzi w nich transformacja (TA) powodująca przejście z jednego stanu do drugiego. Innymi słowy, parametry procesu produkcyjnego w każdej chwili mogą mieć inną wartość. Uwzględniając dowolny przedział czasu (przyjętą umownie jednostkę), można mówić o ciągu stanu wyjść lub wejść. Wielkości składowe wektora \mathbf{Y} , będącego wyjściem z systemu, będą zależały od wielkości strumieni wejść X , zakłóceń Z oraz od reguły transformacji TA [72]. Im bardziej skuteczna będzie reguła transformacji, tym bardziej efektywny będzie wynik jej działania, czyli wielkości składowych i wielkość całkowita wektora \mathbf{Y} . Wartość wektora \mathbf{Y} jest związana następującą zależnością funkcyjną (wyrażoną transformacją) z wektorem \mathbf{X} i \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Y} = TA(\mathbf{X}, \mathbf{Z}) \quad (1)$$

Dlatego często odnośnie do pożądanego przebiegu procesów wprowadza się pojęcie wzorca. Wzorzec opisuje pożądaną przebieg procesów w systemie. W przypadku posiadania wzorca, sterowanie procesami sprowadza się do aproksymacji funkcjonowania procesu do wzorca za pomocą sieci sprzężeń zwrotnych. Sprzężenia zwrotne umożliwiają porównywanie stanów rzeczywistych systemu i poświadanych (wzorców), a następnie korektę wykrytych odchyleń.

W przypadku procesów produkcyjnych wzorcem jest zazwyczaj plan produkcji wyrobów finalnych z określonymi parametrami lub kryteriami i w odpowiedniej skali czasu [211]. Jednak w praktyce produkcyjnej stale towarzyszą zakłócenia, zwane w dalszej części pracy czynnikami ryzyka (r_i), i wytrącają system ze stanu równowagi. Zakłócenia stanowią stały element wejść do systemu produkcyjnego i można je podzielić na wewnętrzne, związane z funkcjonowaniem elementów budujących system i zewnętrzne pochodzące z otoczenia systemu. Do czynników ryzyka można na przykład zaliczyć: zmiany zapotrzebowania na wyroby gotowe, zmiany w zaopatrzeniu w surowce, materiały, energię (w tym zmiany ilościowe, jakościowe i kosztowe), zmiany wynikające z procesów innowacyjnych i inwestycyjnych itd. [211]. Na rysunku 5 przedstawiono zmienność dowolnego parametru $P(t)_i$ spowodowaną oddziaływaniem czynników ryzyka r_i .



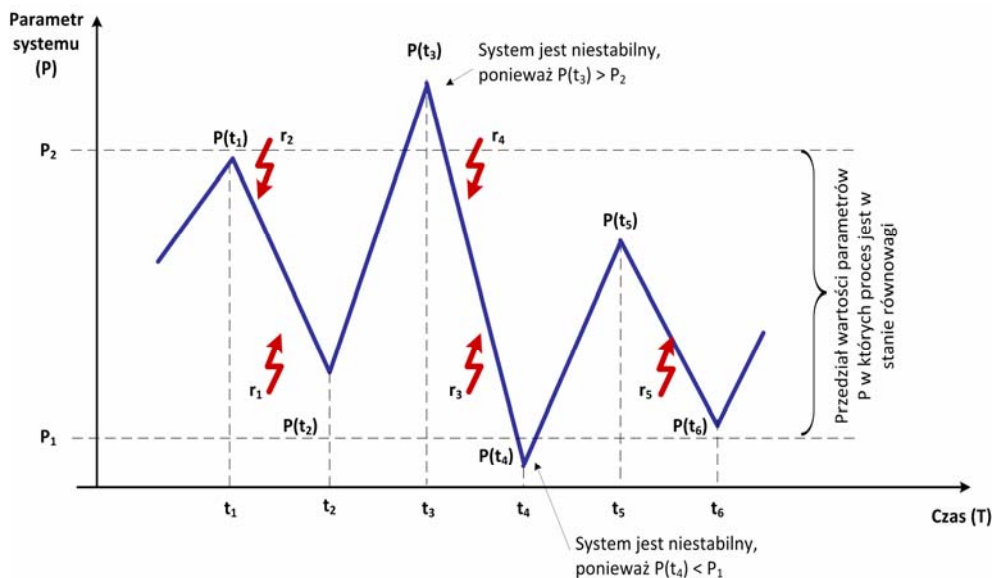
Rys. 5. Zmienność parametru $P(t_i)$ spowodowana oddziaływaniem na system produkcyjny czynników zakłócających (r_i)

Jeśli wartość parametru $P(t)_i$ w chwili t_i znajduje się w ustalonym przedziale $P_1 \leq P(t)_i \leq P_2$, świadczy to o prawidłowym przebiegu procesu. W przeciwnym przypadku należy podjąć działania korygujące. Działania korygujące polegają zazwyczaj na takiej zmianie wielkości zmiennych sterujących (wejść do systemu X), aby wartości parametrów charakteryzujących wielkości sterowane (wyjścia z systemu Y) powróciły do ustalonych, na etapie planowania, wzorców z przebiegu procesu. Właściwa decyzja spowoduje powrót systemu do stanu równowagi.

W niniejszej monografii **stabilność systemu produkcyjnego w założonym marginesie zmienności** będzie rozumiana jako zachowanie przez system stanu równowagi w pewnym założonym okresie. **System produkcyjny znajduje się w stanie równowagi, jeśli określające go wartości parametrów znajdują się w przedziałach zdefiniowanych w funkcji planowania i zapisanych we wzorcu, będącym planem produkcji**, co schematycznie przedstawiono na rysunku 6.

Systemy produkcyjne, oprócz natury technicznej, mają charakter ekonomiczny, a jednym z ich celów istnienia jest generowanie zysku przez stały wzrost udziału w rynku. Jeśli w planach przedsiębiorstwa zapisany jest rozwój i wzrost udziału w rynku, wówczas stabilność systemu produkcyjnego może być rozumiana jako zdolność do utrzymywania lub zwiększania wartości założonych w planach parametrów.

Ponieważ istnieją przynajmniej dwa poziomy planowania, związane z różnym horyzontem czasowym, sterowanie systemami produkcyjnymi należy również rozpatrywać na tych dwóch poziomach (strategicznym i operacyjnym). Sterowanie procesem, w celu zachowania przez niego stabilności na poziomie operacyjnym, będzie sprowadzać się głównie do:



Rys. 6. Stan równowagi systemu

- monitorowania parametrów procesu,
- porównywania uzyskanych wartości parametrów ze wzorcem (planem),
- eliminacji zakłóceń w systemie,
- korygowania odchyleń przez zmianę wartości parametrów wejściowych.

Celem sterowania w dłuższym horyzoncie czasu, na poziomie strategicznym, jest dostosowywanie systemu produkcyjnego do zmian w otoczeniu, co umożliwi mu osiągnięcie założonych celów i rozwoju. Zazwyczaj wiąże się to ze zmianą organizacji. Zmiany te są jednak niezbędne, aby przedsiębiorstwo mogło utrzymać się i konkurować z otoczeniem. Ważne jest to, aby planowane zmiany w jak najmniejszym stopniu zaburzały stabilność obecnie funkcjonującego systemu produkcyjnego.

1.4. CEL I STRUKTURA MONOGRAFII

Aby zapewnić sprawne funkcjonowanie systemu produkcyjnego, należy z jednej strony zapewnić stabilność jego procesów, a z drugiej strony możliwość podejmowania szybkich decyzji obciążonych jak najmniejszym ryzykiem. Innowacje w produkty lub procesy są koniecznym warunkiem utrzymania się na rynku, ale zawsze niosą ze sobą ryzyko utraty stabilności. Ryzyko wynika z niepewności związanej z podejmowaniem decyzji odnośnie do przyszłości oraz z faktu, że wdrażanie innowacji jest jed-

nym z czynników zaburzających dotychczasowe funkcjonowanie przedsiębiorstwa. Istnieje wiele metod i technik modelowania systemów, a na rynku dostępna jest bogata oferta zaawansowanych pakietów informatycznych do modelowania procesów. Modelowanie systemów produkcyjnych umożliwia zapewnienie stabilności systemu produkcyjnego dzięki możliwości:

- zrozumienia i oceny wpływu podejmowanych decyzji na system produkcyjny, w tym na jego różne obszary funkcjonalne,
- zaprojektowania lub reorganizacji systemu produkcyjnego w sposób niezaburzający jego bieżącego i przyszłego funkcjonowania,
- sterowania systemem produkcyjnym przez taki dobór parametrów wejść do systemu, aby zapewnić zaplanowaną wartość parametrów wyjść z systemu,
- identyfikacji, oceny i eliminacji wpływu czynników zakłócających prawidłowe funkcjonowanie systemu produkcyjnego.

Mimo iż w literaturze proponuje się bogatą ofertę opisów metod i technik modelowania systemów gospodarczych, to stosunkowo mało pozycji literaturowych traktuje o modelowaniu procesów i systemów wytwórczych [2, 4, 5, 8, 9, 12, 19, 49, 68, 76, 83, 84, 88, 89, 94, 106, 120, 176, 180, 197, 198, 206, 214, 215]. Wynika to z dużej różnorodności i specyfiki procesów wytwarzania spowodowanej ograniczeniami narzucanymi przez stosowane technologie oraz środki pracy. Kolejną lukę wydawniczą można zauważyć, analizując poszczególne rodzaje i metody modelowania. Bardzo mało jest pozycji literaturowych traktujących przeglądowo metody modelowania. Zazwyczaj w literaturze charakteryzuje się szczegółowo poszczególne rodzaje modeli, nie odnosząc się do innych typów modeli, nawet w obrębie danej grupy. Powoduje to problemy podczas wyboru rodzaju modelu do problemu decyzyjnego. Decydem w przedsiębiorstwach dużo czasu zajmuje wybór metody modelowania, a następnie notacji i narzędzia informatycznego. Problem jest o tyle istotny, że każdy rodzaj modelu wymaga innych danych wejściowych, umożliwia uzyskanie odmiennych wyników i charakteryzuje się innym poziomem szczegółowości.

Dostępne na rynku metody i narzędzia do modelowania systemów produkcyjnych nie dają możliwości bezpośredniej oceny stabilności i ryzyka planowanych zmian. Dlatego w niniejszej pracy proponuje się metodę polegającą na budowie modelu symulacyjnego analizowanego systemu, do którego następnie wprowadza się charakterystyki poszczególnych czynników ryzyka. W ten sposób można wyznaczyć przyrosty czasu w realizacji programu produkcji lub liczba wyprodukowanych elementów w założonym przedziale czasu. Dopiero mając te dane, można oszacować ryzyko za pomocą proponowanych w pracy metod lub ocenić stabilność analizowanego systemu produkcyjnego.

Bardzo istotnym problemem jest też brak możliwości integracji poszczególnych rodzajów modeli. Integracja taka mogłaby przynieść wiele korzyści, gdyż wyniki z jednego typu modelu mogłyby stanowić wejścia do kolejnego. W ten sposób problem decyzyjny mógłby być poddany znacznie pełniejszej analizie, a rozpatrując dany

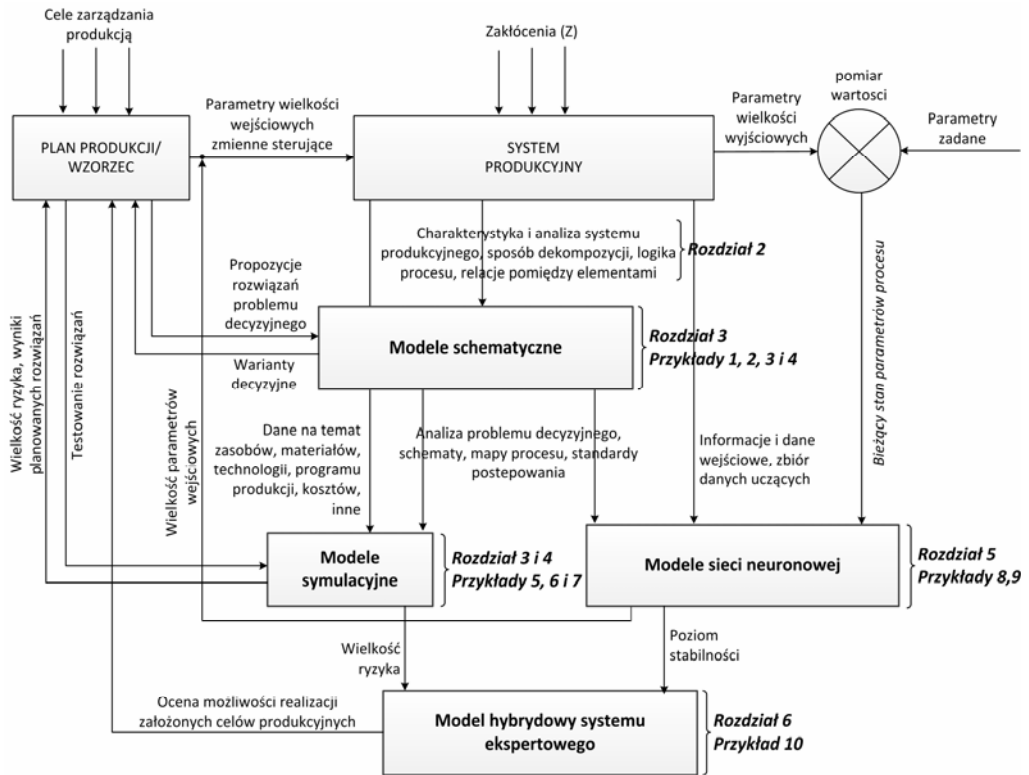
problem decyzyjny można by wziąć pod uwagę znacznie więcej kryteriów, poświęcając na jego rozwiązanie mniej czasu.

Głównym celem niniejszej monografii jest przedstawienie możliwości wykorzystania wybranych metod modelowania systemów produkcyjnych do zapewnienia stabilności przebiegu i realizacji procesów produkcyjnych. **Stabilność systemu produkcyjnego będzie rozumiana jako zachowanie przez system stanu równowagi przez pewien założony okres.** W zapewnieniu stabilności konieczne jest z jednej strony odpowiednie sterowanie, a z drugiej analiza, ocena i eliminacja losowych czynników zakłócających (czynników ryzyka). Sterowanie w kontekście systemów produkcyjnych oznacza podejmowanie decyzji na podstawie informacji lub danych pochodzących ze sterowanego systemu. Wpływ jedno- lub wielokryterialnej decyzji na system produkcyjny bardzo dobrze można sprawdzić na modelu, który zawiera istotne w rozważanym kontekście wybrane elementy i ich parametry oraz łączące je związki i relacje. Bardzo ważnym aspektem jest tutaj dobór odpowiedniego typu modelu do rodzaju i charakteru podejmowanej decyzji. Między innymi dlatego niniejsza monografia jest przedstawieniem dorobku autorki w zakresie różnych rodzajów metod modelowania systemów produkcyjnych, oceny ryzyka i niezawodności na różnych poziomach zarządzania oraz wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do sterowania systemami produkcyjnymi.

Aby w pełni zaprezentować przydatność poszczególnych typów modeli podczas podejmowania decyzji, na końcu rozdziałów lub podrozdziałów zamieszczono przykłady ich praktycznych zastosowań. Przykłady te pochodzą z rzeczywistych zakładów produkcyjnych, w których prowadzone były prace w postaci projektów naukowych, rozwojowych i wdrożeniowych. **Wszystkie przykłady zamieszczone w niniejszej monografii należy traktować jako wielowymiarową koncepcję wykorzystania modelowania w zapewnieniu stabilności systemów produkcyjnych.** Złożoność zagadnienia modelowania, różnorodność systemów produkcyjnych oraz różne poziomy podejmowania decyzji odnośnie do systemu wytwórczego nie ułatwia przedstawienia jednego uniwersalnego przykładu lub prostej, jednowymiarowej metody.

Opisywane w pracy rodzaje modeli i możliwości ich zastosowania w zapewnieniu stabilności systemu produkcyjnego przedstawiono schematycznie na rysunku 7. W celu zilustrowania struktury i układu pracy na rysunku 7 zamieszczono również numery rozdziałów i przykładów, które charakteryzują prezentowane rodzaje modeli.

Jednym z ważniejszych osiągnięć pracy jest zaproponowanie koncepcji fuzji modeli symulacyjnych i modeli sztucznych sieci neuronowych. Zaproponowano model hybrydowego systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonych celów (planów produkcji) wykorzystujący wnioskowanie rozmyte. Proponowany model hybrydowy ułatwił ocenę możliwości realizacji założonego celu w zależności od wielkości ryzyka bądź poziomu stabilności systemu produkcyjnego oraz podejmowanie szybko decyzji na temat zasadności planowanych do wprowadzenia zmian organizacyjnych. Zastosowane reguły wnioskowania rozmytego ułatwiają wyciąganie wniosków na podstawie reguł opartych na wartościach lingwistycznych.



Rys. 7. Rola modeli systemu produkcyjnego w zapewnieniu jego stabilności

Struktura pracy w podziale na rozdziały przedstawia się następująco:

W rozdziale 2 scharakteryzowano współczesne systemy produkcyjne w kontekście wyzwań, jakie stawia przed nimi współczesna gospodarka globalna oraz klient poszukujący coraz częściej produktów i procesów innowacyjnych. Oprócz budowy, cech, typów i innych elementów decydujących o charakterze systemu produkcyjnego dużo miejsca poświęcono techniczno-organizacyjnemu przygotowaniu produkcji. Ten etap procesu produkcyjnego w największym stopniu decyduje o jego innowacyjności, a rola modeli w podejmowaniu decyzji jest największa. Rozdział kończy się opisem idei sterowania systemami produkcyjnymi, charakterystyką najczęstszych typów sterowania produkcją oraz możliwości zastosowania kart kontrolnych jako narzędzia sterowania, kontroli i zapewnienia stabilności przebiegu procesu produkcyjnego.

W rozdziale 3 scharakteryzowano zagadnienie modelowania w kontekście analizy, planowania, sterowania i zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych. Przedstawiono definicje, cechy i typy modeli. W kolejnych punktach rozdziału omówiono różne rodzaje modeli schematycznych. Najwięcej uwagi poświęcono modelom symulacyjnym, ich zastosowaniom w analizie, optymalizacji, reorganizacji i podejmowaniu

decyzji. Przedstawiono i scharakteryzowano etapy projektów symulacyjnych oraz zastosowanie i kryteria wyboru narzędzi informatycznych do modelowania i symulacji. Wszystkie opisane typy modelowania zilustrowano przykładami praktycznymi, pochodzącymi z rzeczywistych przedsiębiorstw przemysłowych, oraz charakterystyką problemu, dla którego rozwiązania budowane były modele. Rozdział kończy się porównaniem prezentowanych metod pod względem wybranych kryteriów oraz zestawieniem danych wejściowych i wyjściowych przedstawionych typów modeli.

W rozdziale 4 opisano zagadnienie analizy i oceny ryzyka w kontekście zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych. Porównano proponowane w literaturze metody ilościowe oraz scharakteryzowano metodę FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*). Zaprezentowano własne metody analizy i oceny ryzyka dla systemów produkcyjnych o różnym typie struktury niezawodnościowej (szeregowej, równoległej i mieszanej) oraz budowę współczynników wagowych, które uniezależniają wielkość wpływu czynników ryzyka na system od poziomu organizacji w przedsiębiorstwie. Zarówno porównanie metod ilościowych, jak i proponowane metody niezawodnościowe oraz konstrukcja współczynnika wagowego były już prezentowane w pracy doktorskiej autorki [41]. Jednak – ponieważ zagadnienie to było rozwijane w publikacjach naukowych, a analiza i ocena ryzyka w systemie produkcyjnym jest warunkiem niezbędnym do zachowania przez system stabilności – zdecydowano się na ich ponownie przedstawienie w niniejszej monografii. W ostatniej części rozdziału zamieszczono przykłady praktyczne, pokazujące zastosowanie metod oceny ryzyka w analizie, i ocenę stabilności systemu produkcyjnego. Do wyznaczania wielkości wpływu czynników ryzyka na system produkcyjny w przykładach wykorzystano modele symulacyjne.

W rozdziale 5 ukazano możliwość zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) w sterowaniu systemami produkcyjnymi. Zawiera on podstawową wiedzę na temat SSN, ich architektury i algorytmów uczenia. Nie analizowano w nim podstaw teoretycznych, a jedynie podstawowe cechy i właściwości SNN w kontekście modelowania procesów produkcyjnych. Możliwość wykorzystania modeli SSN pokazano na przykładzie systemu wydobywczego, będącego z natury procesem niestabilnym, oraz systemu produkcji wiązek elektrycznych. Dla tych przykładów zbudowano modele SSN, za pomocą których możliwe jest sterowanie wartościami parametrów wejściowych procesów, tak aby procesy pozostawały stabilne, czyli aby wartość wyjścia z danego procesu pozostawała w ustalonym przedziale wartości.

W rozdziale 6 zawarto koncepcję połączenia modeli symulacyjnych i modeli SSN. Proponowany model hybrydowy łączy model symulacyjny z modelem SSN przez bazę wiedzy eksperckiej i wnioskowanie rozmyte. Ze względu na odmienny charakter, budowę, rodzaj wykorzystywanych danych i inne cechy, fuzja obydwu typów modeli może się odbyć jedynie dzięki bazie wiedzy eksperckiej. Zastosowane reguły wnioskowania rozmytego umożliwiają wyciąganie wniosków na podstawie reguł opartych na wartościach lingwistycznych. Proponowaną koncepcję fuzji obydwu typów modeli

zweryfikowano przez budowę systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonego programu produkcji wiązek elektrycznych.

Wszystkie prezentowane w pracy typy modeli zilustrowane zostały przykładami praktycznego zastosowania. Przykładem, dla którego analizowano przydatność modeli symulacyjnych i modeli sztucznych sieci neuronowych w zapewnieniu stabilności systemów produkcyjnych, jest system produkcji wiązek elektrycznych. Przykład ten wprowadzono, aby wyeliminować różnice i specyfikę występującą w systemach rzeczywistych i dzięki temu móc porównać jedynie funkcjonalność poszczególnych typów modeli.

2. CHARAKTERYSTYKA WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

W rozdziale scharakteryzowano cechy i budowę współczesnych systemów produkcyjnych na tle zmian w otoczeniu, w którym funkcjonują. Ze względu na to, iż motorem rozwoju współczesnych przedsiębiorstw są innowacje, a klienci coraz częściej wybierają produkty innowacyjne, przedstawiono dane statystyczne na temat przedsiębiorstw wdrażających innowacje. Scharakteryzowano główne etapy produkcji ze szczególnym uwzględnieniem techniczno-organizacyjnego przygotowania produkcji w kontekście inżynierii współbieżnej i roli technologii informatycznej w zarządzaniu procesem produkcyjnym. Ostatni punkt poświęcono zagadnieniom sterowania i metodom sterowania systemami produkcyjnymi. We wszystkich punktach rozdziału uwzględniono rolę modeli i zalety modelowania w zarządzaniu systemami produkcyjnymi.

Podstawową cechą współczesnego rynku jest globalizacja spowodowana między innymi postępowaniem naukowo-technicznym, w tym rozwojem i upowszechnieniem systemów informatycznych. Przedsiębiorstwa, jako organizacje gospodarcze, generują jedynie koszty. Zysk powstaje w ich otoczeniu, dlatego jego cechy, charakter i tendencje rozwojowe stanowią szansę dla prowadzonej działalności. Sukces rynkowy jest przypisany jedynie tym przedsiębiorstwom, które przez właściwe zarządzanie odpowiednio szybko dostosują swoje struktury, zasoby i sposób funkcjonowania do warunków i zmian w otoczeniu, upatrując w tym szansę na uzyskanie przewagi konkurencyjnej.

Doskonała jakość i niska cena nie jest już warunkiem uzyskania przewagi konkurencyjnej, lecz podstawą prowadzenia działalności. Klienci oczekują wyrobów innowacyjnych, zróżnicowanych, dostarczanych w mniejszej ilości, a także częstych dostaw i krótkich czasów realizacji zamówień. Za czynniki warunkujące uzyskanie przewagi konkurencyjnej uważa się [108, 166, 205]:

- krótki czas podejmowania decyzji,
- krótki czas dostarczania nowych lub zmodyfikowanych produktów na rynek,
- sprawną komunikację,
- nawiązywanie współpracy i kooperacji z innymi przedsiębiorstwami,
- elastyczność i zwinność,
- dużą przedsiębiorczość i chęć podejmowania ryzyka,

- prowadzenie działań na rzecz innowacji w przedsiębiorstwie,
- posiadanie kapitału intelektualnego i chęć jego podnoszenia,
- dobrą współpracę wewnętrzną i otwartość na inicjatywy zewnętrzne.

Chcąc sprostać tym wyzwaniom, zmianie musi ulec podejście do zarządzania systemami produkcyjnymi. Rolą współczesnego zarządzania jest z jednej strony zapewnienie stabilnego przebiegu procesów produkcyjnych, a z drugiej stworzenie warunków do wprowadzania innowacji, zarówno produktowych jak i procesowych. Stąd bardzo popularne koncepcje szczupłego wytwarzania (ang. *Lean Manufacturing*, *Lean Production*) oraz wytwarzania zwinnego (ang. *Agile Manufacturing*, *Agile Production*). Koncepcja *Lean Production* zakłada eliminację wszelkich strat i marnotrawstwa, a skupieniu się na wartości dodanej i szeroko pojętej standaryzacji. W odróżnieniu *Agile Production* odbywa się w warunkach ciągłych zmian, których nie można kontrolować. Jednak w obydwu tych koncepcjach najważniejszy jest klient, jego potrzeby, oraz wiedza i kapitał intelektualny pracowników. Historię ewolucji systemów produkcyjnych, ze względu na najważniejsze zmiany w otoczeniu przedsiębiorstw, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ewolucja systemów produkcyjnych ze względu na zmiany w otoczeniu [108, 109]

	Produkcja jednostkowa	Produkcja masowa	Elastyczne systemy produkcyjne	Masowy konsumpcjonizm i personalizacja	Produkcja zrównoważona
Lata	~1850	1913	~1980	2000	2020?
Potrzeby społeczne	Produkty indywidualne	Niskie koszty produkcji	Zróznicowanie produktów	Produkty innowacyjne	Produkty innowacyjne, przyjazne środowisku
Rynek	Bardzo mała wielkość produkcji	Popyt większy od podaży	Podaż większa od popytu Małe serie produkcyjne	Globalizacja Zmienność popytu	Środowisko
Model biznesowy	Produkcja na zamówienie	Systemy pchające	Systemy pchające i ssące	Systemy ssące	Systemy ssące
Osiągnięcia technologiczne	Elektryczność	Części wymienne	Komputery	Systemy informatyczne	Nanotechnologia Biotechnologia

Innowacje są nie tylko czynnikiem umożliwiającym rozwój przedsiębiorstw, ale też i całych gospodarek narodowych i społeczeństw. Dzięki innowacjom powstają nowe, lepsze miejsca pracy w szczególności opartej na wiedzy, czyli wzrost poziomu wykształcenia. Poprawa produktywności i efektywności przedsiębiorstw przekłada się z kolei na wzrost zamożności społeczeństwa. Nowe rodzaje produktów, powstających dzięki innowacjom, otwierają nowe rynki i możliwości prowadzenia działalności gospodarczej oraz powstawanie nowych miejsc pracy [90]. Nie należy zapominać rów-

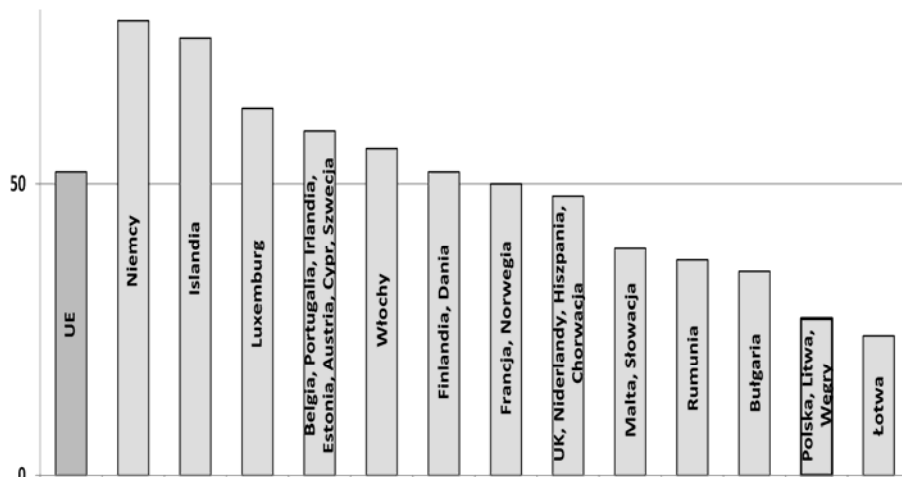
niez o aspektach ekologicznych, takich jak lepsze wykorzystanie zasobów naturalnych, mniejsze zużycie energii i zanieczyszczenie otoczenia naturalnego człowieka [25, 175].

2.1. ROLA I ZNACZENIE INNOWACJI WE WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Innowacyjność we współczesnej gospodarce jest postrzegana jako jeden z najważniejszych czynników osiągania przewagi konkurencyjnej przez przedsiębiorstwa [165]. „Innowacja to wdrożenie nowego lub znacznie udoskonalonego produktu (wyrobu lub usługi) lub procesu, nowej metody marketingowej, nowego sposobu organizacji w praktyce biznesowej, organizacji miejsc pracy lub powiązań zewnętrznych” [157]. Według *Polskiego Rocznika Statystycznego* innowacja to „[...] wdrożenie w praktyce gospodarczej nowego albo znacząco udoskonalonego produktu, usługi lub procesu, w tym także wdrożenie nowej metody marketingowej lub organizacyjnej redefiniującej sposób pracy lub relacje firmy z otoczeniem” [175]. Wprowadzenie innowacji w przedsiębiorstwie powoduje poprawę jakości produktów, zwiększenie wydajności procesów, większe zyski, lepsze i szybsze reagowanie na zmieniające się potrzeby klientów, zmniejszenie ilości odpadów i liczby przestojów oraz inne pozytywne rezultaty.

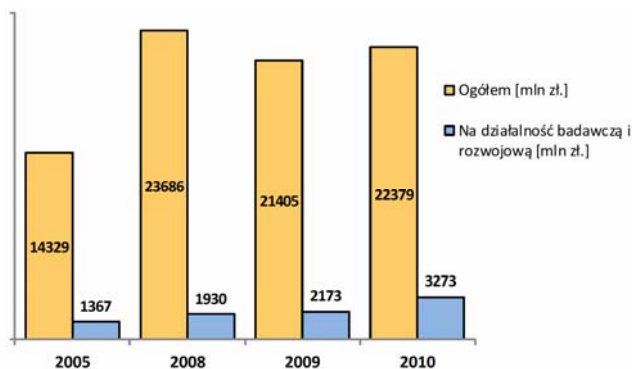
Badania statystyczne na temat innowacyjności przedsiębiorstw od 1992 roku prowadzą wszystkie państwa członkowskie UE oraz większość państw należących do OECD oraz Rosja i RPA. W Polsce wskaźniki innowacyjności monitorowane są zarówno przez Główny Urząd Statystyczny (GUS), jak i również przez Europejski System Statystyczny (Eurostat). Wzrost znaczenia innowacji w rozwoju przedsiębiorstw i ich wpływu na wyniki gospodarek narodowych widać na przykładzie liczby przedsiębiorstw innowacyjnych w poszczególnych krajach UE. Na rysunku 8 przedstawiono współczynnik przedsiębiorstw innowacyjnych do wszystkich przedsiębiorstw, które w 2008 r. wdrożyły innowacje.

Wśród państw członkowskich UE największa skłonność do innowacji w roku 2008 (rys. 8) została zarejestrowana w Niemczech (79,9% wszystkich przedsiębiorstw), następnie w Luksemburgu (64,7%). Tylko w tych dwóch państwach stosunek przedsiębiorstw, które w 2008 r. zdecydowały się na innowacje, wynosił ponad 60%. W całej UE (z wyłączeniem Grecji) średnia przedsiębiorstw, które zainwestowały w innowacje, osiągnęła 51,6%. Najniższy poziom odnotowano na Łotwie (24,3%), w Polsce (27,9%) i na Węgrzech (28,9%).



Rys. 8. Stosunek przedsiębiorstw innowacyjnych do wszystkich przedsiębiorstw w 27 krajach UE z wyłączeniem Grecji w 2008 r. [221]

Pomimo iż Polska na tle innych krajów UE w stosunku liczby przedsiębiorstw innowacyjnych wypada niekorzystnie, to również w Polsce można zaobserwować wzrost nakładów przedsiębiorstw na działalność innowacyjną. Na rysunku 9 przedstawiono zestawienie poniesionych wydatków przez przedsiębiorstwa produkcyjne na działalność innowacyjną, w tym na prace badawcze i rozwojowe w latach 2005–2011. Dane podane są w cenach bieżących, które odpowiadają uzyskanym dochodom, poniesionym wydatkom lub wartości wyrobów, usług i dotyczą przedsiębiorstw zatrudniających powyżej 49 osób. W zestawieniu na rysunku 9 pominięto dane na temat nakładów na zakup wiedzy ze źródeł zewnętrznych, budynki, budowle oraz grunty, maszyny, urządzenia techniczne, narzędzia, środki transportu, szkolenia oraz marketing w zakresie opracowanych innowacji.

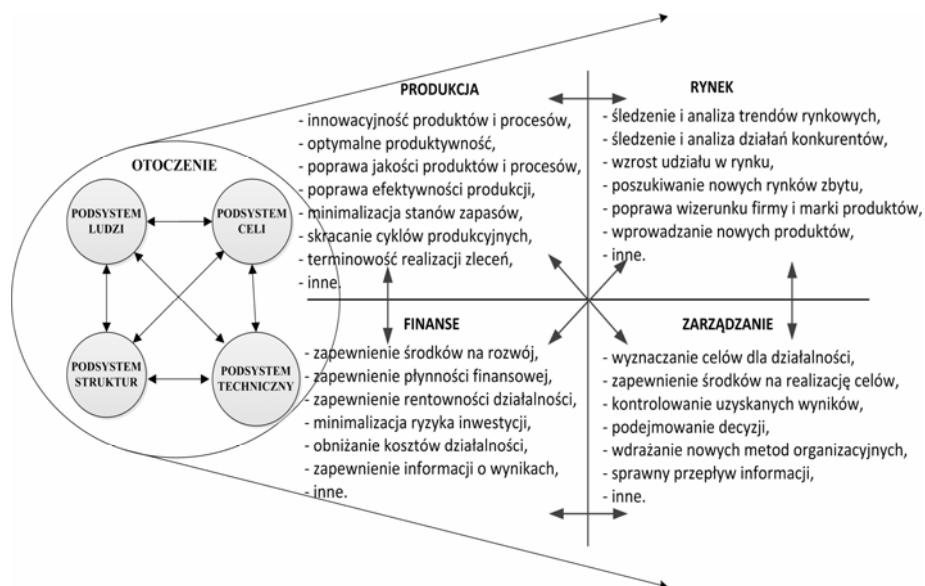


Rys. 9. Zestawienie poniesionych wydatków przez polskie przedsiębiorstwa produkcyjne na działalność innowacyjną, w tym na prace badawcze i rozwojowe [175]

Motorem rozwoju przedsiębiorstw, a pośrednio również gospodarek poszczególnych państw, są innowacje i zróżnicowane wyroby. Od zarządzających oczekuje się podejmowania szybkich i trafnych decyzji odnośnie do wprowadzania na rynek nowych wyrobów. Postępuje integracja zadań i funkcji w wielu, kiedyś odrębnych, obszarach przedsiębiorstwa: w zarządzaniu, wytwarzaniu i projektowaniu nowych produktów. Dlatego zapewnienie sprawnego i stabilnego funkcjonowania systemów produkcyjnych oraz szybka ocena możliwości realizacji zleceń stają się zadaniami szczególnie ważnymi w zarządzaniu współczesnymi przedsiębiorstwami.

2.2. BUDOWA, CECHY I ANALIZA WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Wszystkie organizacje składają się z czterech podsystemów: ludzi, celów, struktur organizacyjnych oraz techniki, w której skład wchodzi zarówno środki materialne, jak i *know-how*. Aby przedsiębiorstwo było sprawne, zmiany w jednym podsystemie powinny powodować zmiany w pozostałych. Dodatkowym warunkiem rozwoju jest realizacja celów wyznaczonych w podstawowych zakresach działalności, co schematycznie przedstawiono na rysunku 10.

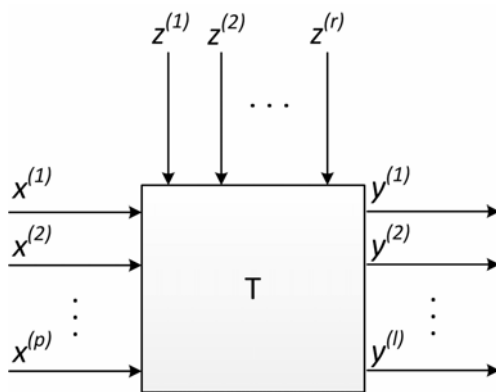


Rys. 10. Kluczowe cele współczesnego przedsiębiorstwa produkcyjnego

W literaturze można spotkać wiele różnych definicji systemu produkcyjnego [9, 11, 23, 76, 114, 149, 163, 200, 214]. Analizując definicje i cechy systemów produkcyjnych można wyróżnić następujące właściwości:

- są strukturami złożonymi, hierarchicznymi i zaprojektowanymi dla realizacji określonych celów,
- składają się z podsystemów, których zadaniem jest realizacja różnych funkcji,
- składają się z elementów (materialnych, niematerialnych, ludzkich) pełniących różne funkcje, które mogą wchodzić w skład innych systemów,
- pomiędzy elementami systemu istnieje wiele powiązań oraz integracja powodująca, że zmiany w jednym elemencie powodują zmiany w pozostałych,
- zachodzą w nich procesy o różnym charakterze,
- są dynamiczne (zmiennie w czasie) i podlegają cyklowi życia (mają skończoną trwałość, zużywają się i wymagają odnowy),
- są otwarte, tzn. ulegają wpływowi i wpływają na otoczenie, wymieniając z nim elementy,
- podlegają prawom ekonomii oraz są podatne na warunki społeczne.

Według teorii systemów system to zorganizowany, celowy zbiór elementów z określonymi właściwościami i relacjami [47]. Każdy z nich jest całością wyodrębnioną z otoczenia umownie, ma określoną strukturę (organizację), ma do spełnienia określone funkcje i cele, dla których został zaprojektowany, wpływa na sąsiednie elementy i systemy oraz na otoczenie, podlega ewolucji w czasie oraz działaniu czynników zakłócających pochodzących z otoczenia. Systemy mogą realizować zadania, którym nie poddałyby pojedyncze elementy lub mogą je zrealizować sprawniej i bardziej efektywnie [22].



Rys.11. Schemat systemu [24]

Schematycznie model systemu produkcyjnego można przedstawić tak jak na rysunku 11. Według tego modelu system produkcyjny jest układem wyodrębnionym

z otoczenia i odosobnionym, czyli wymiana z otoczeniem następuje jedynie przez wyjścia (Y) i wejścia (X i Z). Proces produkcyjny (TA), zwany również procesem przetwarzania lub transformacji, stanowi regułę przekształcenia strumieni wejściowych (X , Z) na strumień wyjściowy (Y), co można zapisać w postaci funkcji: $Y = TA(X, Z)$.

Wejściami do systemu przedstawionego na rysunku 11 są składowe wektora wejść \mathbf{X} oraz składowe wektora zakłóceń oznaczonego jako \mathbf{Z} . Składowe wektora \mathbf{X} nazywane są również wielkościami sterującymi, natomiast składowe wektora wyjść \mathbf{Y} nazywane są wielkościami sterowanymi. Zapisywane są one w postaci macierzy kolumnowych:

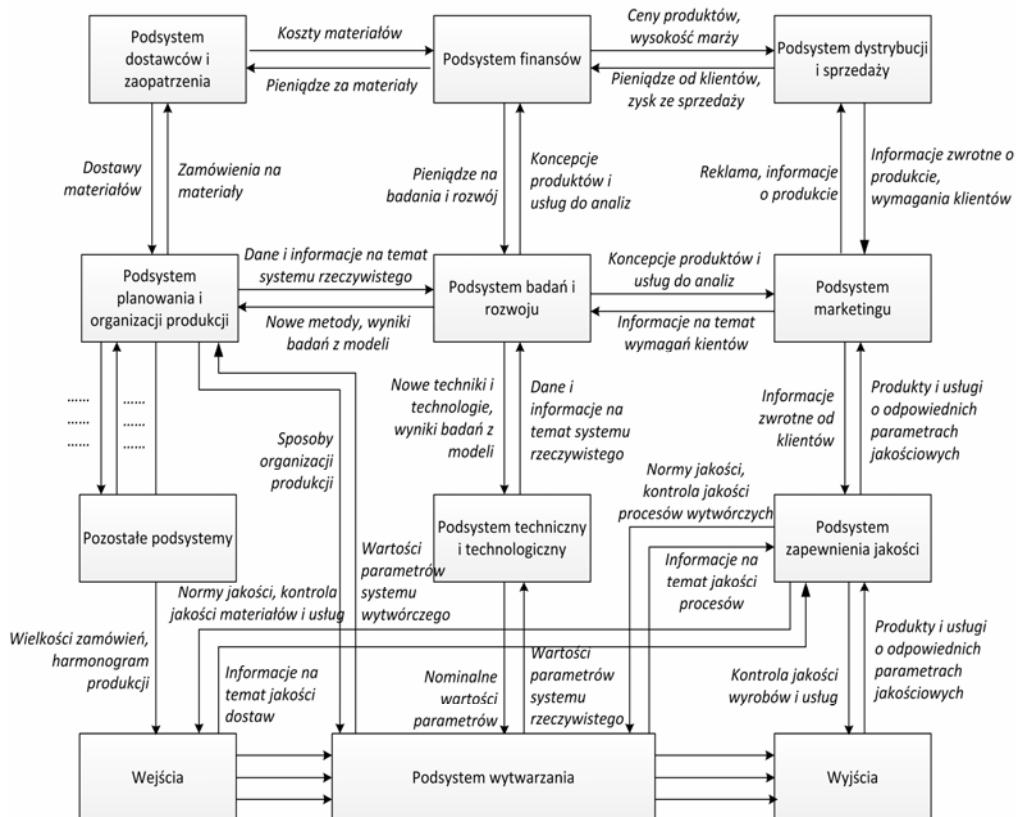
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x^{(1)} \\ x^{(2)} \\ \vdots \\ x^{(p)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z^{(1)} \\ z^{(2)} \\ \vdots \\ z^{(r)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(l)} \end{bmatrix}$$

Charakterystyka tych wielkości jest następująco [24]:

- Wielkości sterowane Y – wartości, dla których precyzuje się określone wymagania (cel sterowania) wyrażone wartościami uzyskiwanymi na podstawie pomiarów, obserwacji lub przetwarzania informacji. Są wyjściami z systemu. Przykładami wielkości sterowanych może być np. wydajność, wielkość produkcji, zysk ze sprzedaży itd.
- Wielkości sterujące X – są wejściami do systemu, mają wpływ na wielkości sterowane przez ich właściwy dobór i zmiany. Dlatego często nazywane są również wielkościami zarządzającymi lub zmiennymi decyzyjnymi. Można je zmieniać, a ich wartości zależą od decyzji sterujących. Przykładami wielkości sterujących w produkcji są wielkość i parametry surowca, ilość i wydajność środków produkcji itd.
- Zakłócenia Z – mają charakter losowy, są również wejściami do systemu, pochodzą z otoczenia i charakteryzują jego wpływ na system. Podobnie jak wielkości sterujące mają wpływ na wielkości sterowane. Mogą być mierzalne – czyli mierzone w czasie sterowania, a aktualne informacje o ich wartościach są wykorzystywane do podejmowania decyzji sterujących – lub niemierzalne. Sterowanie często sprowadza się do przeciwdziałania wpływu zakłóceń na system.

Formalny opis zależności pomiędzy wymienionymi wielkościami charakterystycznymi nazywa się modelem obiektu [24]. Proces produkcyjny TA jest regułą przekształcania elementów wejścia (X i Z) w elementy wyjścia (Y). Wyznaczenie transformacji jest zagadnieniem złożonym i do dzisiaj nierozwiązanym. Jeśli udałoby się wyznaczyć transformację TA , to przez np. symulację komputerową możliwe byłoby ocenianie wpływu podejmowanych decyzji na elementy wyjściowe systemu produkcyjnego ze 100% pewnością. Przybliżona postać transformacji systemu lub jego części stanowi model tego systemu [163].

Transformacja w systemach produkcyjnych to różnego typu procesy, czyli ciągi następujących po sobie zadań lub operacji [79, 134]. Oczywiście najważniejszym procesem zachodzącym w systemie produkcyjnym jest proces wytwórczy zwany procesem podstawowym. Proces produkcyjny to uporządkowany zbiór czynności oraz przepływ materiałów, którego celem jest przetworzenie zasobów w produkty i dostarczenie ich klientom w uzgodnionych terminach i ilościach [9]. Proces produkcyjny należy jednak traktować szeroko, gdyż w jego skład wchodzi proces badań i rozwoju (ang. *Research and Development*), proces wytwórczy oraz proces dystrybucji i obsługi klienta. Najważniejszą częścią procesu wytwórczego jest proces technologiczny, w którym następuje zmiana kształtów, wymiarów, powierzchni, właściwości fizykochemicznych materiałów bądź też zmiana wzajemnego położenia elementów składających się na wyrób. Jednak proces technologiczny nie może przebiegać bez procesów pomocniczych takich, jak: transport materiałów, utrzymania ruchu, zamawianie materiałów i innych procesów, np. administracyjnych czy zarządczych. Wszystkie te procesy przebiegają w sposób równoległy w systemach produkcyjnych i są wzajemnie powiązane.



Rys. 12. Podstawowe podsystemy systemu produkcyjnego i wybrane powiązania pomiędzy nimi

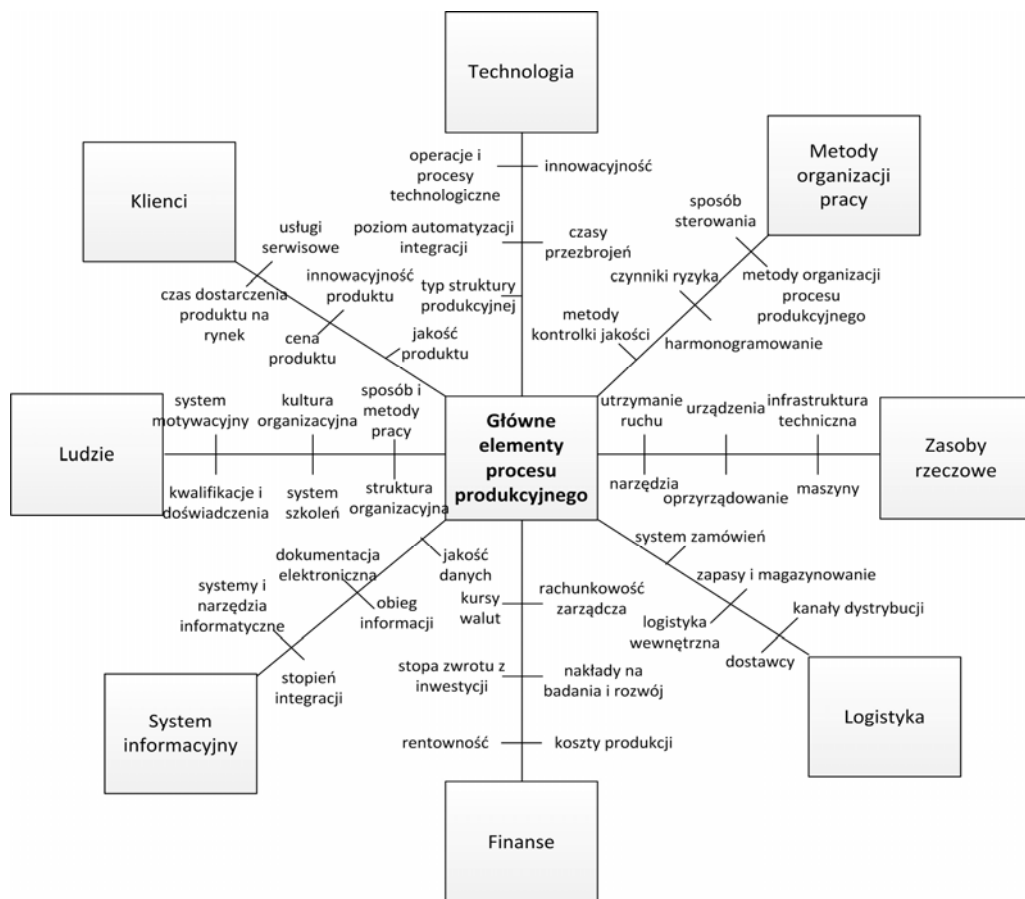
Każde przedsiębiorstwo charakteryzuje zbiór wyrobów i usług, które może wytwarzać z wykorzystaniem określonych zasobów produkcyjnych, technologii i metod organizacji produkcji. To właśnie charakter procesu produkcji nie umożliwia traktowania systemów produkcyjnych jako typowych systemów technicznych [72]. Poszczególne elementy systemu produkcyjnego oraz procesy w nim przebiegające składają się na zintegrowane, wzajemnie na siebie oddziałujące podsystemy. Cechą systemu produkcyjnego jest jego polistrukturalność, co oznacza, że w ramach każdego przedsiębiorstwa produkcyjnego istnieje wiele struktur, z których każda ma swoje własne części i powiązania między nimi [86]. Liczba i rodzaj podsystemów oraz elementów i procesów je tworzących jest umowna i w każdym przedsiębiorstwie produkcyjnym podział ten może być inny. Na rysunku 12 przedstawiono najważniejsze podsystemy systemu produkcyjnego i wybrane powiązania pomiędzy nimi.

O cechach, sposobie przebiegu i charakterze procesu produkcyjnego decyduje między innymi wielkość i rodzaj produkcji. Najczęstszym podziałem na typy produkcji, w zależności od jej wielkości oraz od częstotliwości, z jaką zmienia się produkowany wyrób, jest podział na produkcję jednostkową, małoseryjną, średnioseryjną i masową.

W produkcji jednostkowej wytwarzane są pojedyncze wyroby na indywidualne zamówienie klienta. W tego typu procesie nie ma standaryzacji, a większość prac wykonywana jest przez wysoko wykwalifikowanych pracowników za pomocą uniwersalnych maszyn i narzędzi. Produkcja tego typu jest bardzo elastyczna, jednak towarzyszy jej duży koszt i dłuższy czas wykonania wyrobu. Na drugim biegunie tej klasyfikacji znajduje się tzw. produkcja masowa. W tego typu procesach wytwarzane są produkty powszechnego użytku produkowane w dużej ilości. Proces produkcyjny cechuje duża standaryzacja i przebiega z wykorzystaniem doskonale wyspecjalizowanych maszyn i urządzeń, w których przezbrojenia stosuje się bardzo rzadko lub wcale. Produkty cechuje mały koszt jednostkowy.

Z podanej charakterystyki systemu produkcyjnego wynika, że jego dekompozycja na elementy składowe może być realizowana po wykorzystaniu różnorodnych kryteriów, a sposób jej przeprowadzenia powinien zależeć od celu analizy oraz od przyjętych klasyfikatorów. Złożoność i zróżnicowanie systemów produkcyjnych jest również głównym powodem braku możliwości zbudowania jednego uniwersalnego modelu opisującego jego budowę lub sposób funkcjonowania. Modele takie mogą być jedynie na bardzo wysokim stopniu ogólności i nie ma możliwości wnioskowania na ich podstawie na temat konkretnego przedsiębiorstwa produkcyjnego.

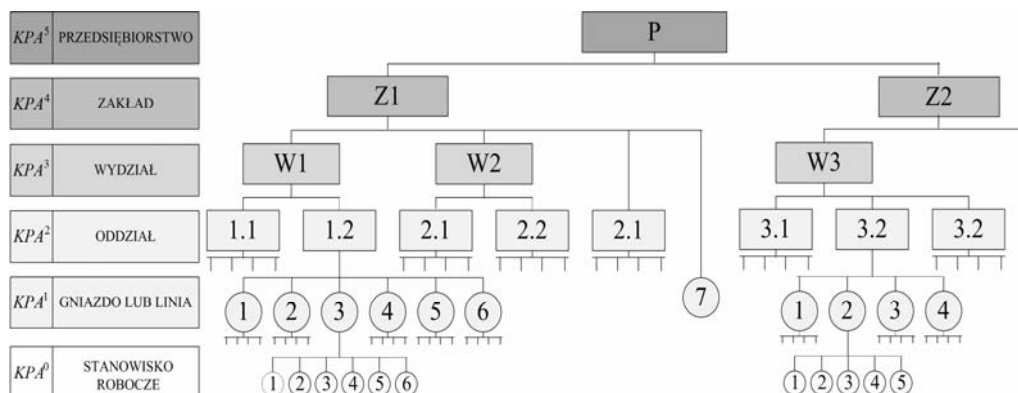
W budowie modelu, a następnie analizie systemu produkcyjnego, oprócz odpowiedniej dekompozycji, równie ważny jest wybór elementów, które będą analizowane. Można wymienić przynajmniej osiem istotnych elementów decydujących o strukturze i cechach realizowanych procesów produkcyjnych. Należą do nich stosowana technologia, metody organizacji pracy, posiadane zasoby rzeczowe, system logistyczny, system finansowy, system informacyjny, ludzie w organizacji oraz jej klienci. Wymienione elementy oraz ich najważniejsze składowe schematycznie zaprezentowano na rysunku 13.



Rys. 13. Główne elementy i ich składowe opisujące system produkcyjny

Kolejnym zagadnieniem podczas przeprowadzania analizy systemu produkcyjnego jest wybór poziomu, na którym system będzie analizowany. W tym celu wygodnie jest posłużyć się strukturą produkcyjno-organizacyjną ze względu na jej uniwersalny charakter oraz możliwość jej adaptacji do różnorodnych dekompozycji.

Struktura produkcyjno-organizacyjna jest układem komórek produkcyjnych oraz zespołem związków organizacyjnych między nimi [43]. Komórki produkcyjne mogą mieć różne stopnie. Najmniejszą komórką produkcyjną jest stanowisko robocze, które określa się jako komórkę produkcyjną stopnia zerowego (KP^0). Strukturę produkcyjną tworzą odpowiednio pogrupowane stanowiska robocze w komórki produkcyjne stopnia pierwszego (KP^1), które z kolei łączy się według przyjętych kryteriów w komórki produkcyjne stopnia drugiego (KP^2) itd., aż do komórek stopnia n (KP^n) odpowiednio dla danej jednostki wytwórczej. Na rysunku 14 przedstawiono schemat sześciostopniowej struktury produkcyjno-organizacyjnej.

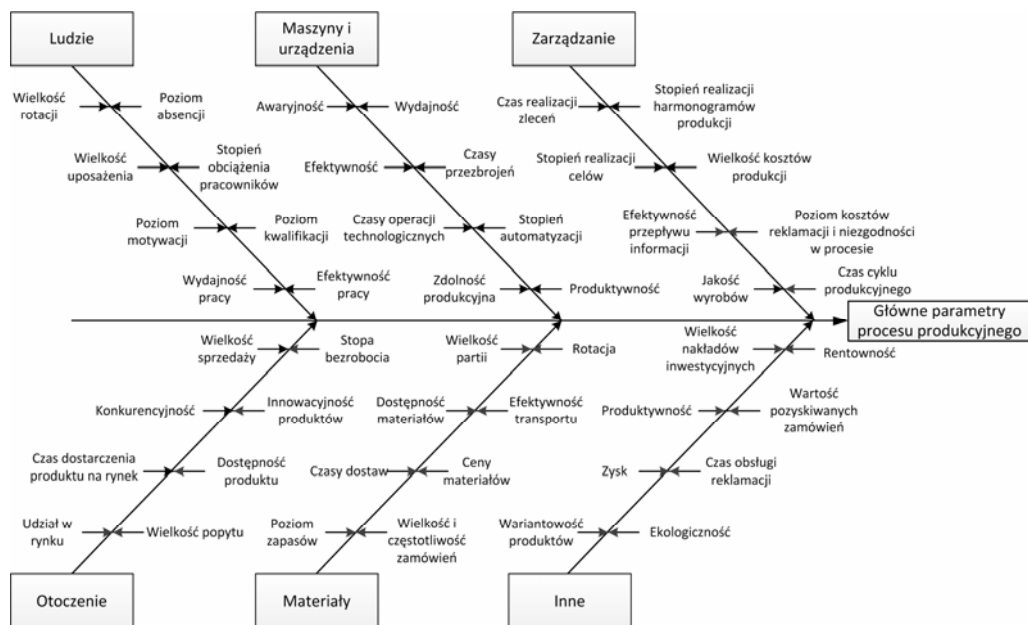


Rys. 14. Schemat struktury produkcyjno-organizacyjnej

Z poziomem, na którym rozpatrywany jest system produkcyjny, ściśle powiązany jest poziom zarządzania, czyli poziom, na którym podejmowane są decyzje. Decyzje odpowiadające najwyższemu szczeblom struktury produkcyjno-organizacyjnej nazywane są decyzjami strategicznymi. Dotyczą one realizacji celów długoterminowych przedsiębiorstwa. Decyzje podejmowane na średnich szczeblach struktury (wydziałów, oddziałów) nazywane są decyzjami taktycznymi i odnoszą się do realizacji planów w średnim okresie planowania (zazwyczaj rocznym), wraz z przypisaniem zasobów niezbędnych do realizacji tych planów. Decyzje operacyjne podejmowane na poziomie gniazd i stanowisk roboczych dotyczą zazwyczaj realizacji konkretnych zadań i działań niezbędnych do wykonania, tak aby terminowo i skutecznie realizować zadania produkcyjne.

Kolejnym zagadnieniem w analizie systemów produkcyjnych jest wybór parametrów i wskaźników, za pomocą których system będzie opisywany, a następnie kontrolowany. System produkcyjny może być opisany przez ogromną liczbę parametrów i wskaźników o charakterze ilościowym i jakościowym. W zasadzie wszystkie dane przedsiębiorstwa mogą być wskaźnikami (tzw. wskaźniki proste) lub mogą posłużyć do ich budowy (wskaźniki złożone). Tak jak nie istnieje jedna definicja systemu produkcyjnego, tak samo nie ma możliwości jego opisanie z użyciem jednego wskaźnika lub parametru. Do tego celu zazwyczaj wykorzystuje się tzw. wskaźniki relacyjne, utworzone na podstawie relacji przynajmniej 12 parametrów wpływających na efekty działalności gospodarczej przedsiębiorstwa [45].

Wybór parametrów zależy będzie od poziomu, na którym prowadzona jest analiza, oraz od przyjętego kryterium dekompozycji. I tak parametry mogą odnosić się do zadań, procesów, stanowisk roboczych, gniazd lub linii produkcyjnych czy całego przedsiębiorstwa. Podstawowym celem zbierania danych na temat wartości parametrów jest sterowanie systemem produkcyjnym. Na rysunku 15 przedstawiono wybrane parametry charakteryzujące proces produkcyjny.



Rys. 15. Wybrane parametry opisujące proces produkcyjny

Warunki konkurencji i zarządzania współczesnymi systemami produkcyjnymi wymuszają na podejmujących decyzje pełną identyfikację, standaryzację i parametryzację procesów, gdyż tylko na podstawie pełnej informacji na temat stanu systemu produkcyjnego można podejmować właściwe decyzje. Rozwój technologii informatycznych umożliwia bieżące monitorowanie i sterowanie systemami produkcyjnymi, a w kontekście wprowadzania innowacji możliwość budowy modeli tych procesów, według których decyzje mogą być podejmowane łatwiej i szybciej.

2.3. TECHNICZNE I ORGANIZACYJNE PRZYGOTOWANIE PRODUKCJI

Na przygotowanie produkcji nowego wyrobu składa się przygotowanie techniczne i organizacyjne w ścisłym połączeniu z rachunkiem ekonomicznym. Faza projektowania wyrobu ma największy wpływ na kosztocłonność produkcji, gdyż w tej fazie powstaje koncepcja, struktura funkcjonalna, następuje dobór materiałów determinujący wybór technologii wytwarzania, a następnie strukturę i parametry procesów wytwórczych [63, 185, 202]. Według badań 60–95% kosztów produktu jest zdeterminowana

w fazie projektowania, natomiast koszty przygotowania produkcji stanowią jedynie około 17% kosztów wytwarzania [187]. W związku z tym decyzje podjęte na etapie projektowania produktu będą przekładać się na jego późniejszą pozycję na rynku. Dlatego decydującą rolę w rozwoju produktu odgrywają systemy informatyczne umożliwiające modelowanie, analizę i ocenę projektowanych wyrobów i procesów.

Rolę techniczno-organizacyjnego przygotowania produkcji w zapewnieniu stabilności funkcjonowania systemów produkcyjnych prezentuje tzw. paraboliczna funkcja strat Taguchiego. Według tej funkcji im bardziej cecha wyrobu odbiega od zaplanowanej wartości docelowej, tym większa jest strata [184]. Niewykrycie niezgodności na n -tym etapie (K_{CN}) skutkuje orientacyjnie dziesięciokrotnie wyższymi kosztami na ich usunięcie na etapie $n + 1$ [51, 184]. Jak ważne jest odpowiednie zaprojektowanie, a później sterowanie procesami produkcyjnymi pokazano na rysunku 16 przedstawiającym koszty ponoszone w związku z wykryciem wad na poszczególnych etapach realizacji produkcji (KC).



Rys. 16. Wzrost kosztów wykrycia niezgodności i wad w procesie produkcyjnym

Techniczne i organizacyjne przygotowanie produkcji można określić jako zespół działań prowadzących do opracowania nowych wyrobów i procesów lub rozwoju obecnych. Jego celem jest zapewnienie, że przedsiębiorstwo dostarcza na rynek produkty oczekiwane przez klienta. Decyzje dotyczące rozwoju wyrobu i projektowania procesu produkcyjnego podejmowane są zawsze, gdy [200]:

- wprowadza się nowy wyrób,
- rozwija się stary wyrób,
- następują zmiany popytu,
- zmieniają się koszty, lub gdy starzeje się technologia wytwarzania,
- konkurencja zmienia produkt,
- następują znaczące zmiany na rynku zbytu,
- dotychczasowa działalność produkcyjna jest niezadowolająca.

Przygotowanie produkcji składa się z przygotowania konstrukcyjnego, technologicznego i organizacyjnego. Fazy te poprzedzane są badaniami przedprojektowymi i pracami badawczo-rozwojowymi. Następuje tutaj opracowanie koncepcji produktu na bazie prognoz rynkowych i badań potrzeb klienta, zmierzające do określenia nowego wyrobu. Projekt koncepcyjny jest zazwyczaj opracowywany przez zespół interdyscyplinarny i często międzynarodowy, w którego skład wchodzi specjaliści z różnych branż takich, jak: marketing, wzornictwo przemysłowe, a nawet nauki fizyczne. Ce-

lem zespołu projektowego jest przełożenie danych rynkowych i wymagań użytkowników na funkcje produktów, szacunki kosztów i przyszłych zysków. Wynikiem tych prac jest dokumentacja zawierająca wymagania projektowe, identyfikację rynków docelowych, metody i techniki projektowania oraz zasoby wymagane do „rozwoju” produktu. Dodatkowo w etapach tych powstają szkice i rysunki wyrobów oraz makiety produktów [107].

Konstrukcyjne przygotowanie produkcji obejmuje między innymi określenie założeń funkcjonalnych i konstrukcyjnych, dobór materiałów, opracowanie projektów i prototypów wyrobów wraz z dokumentacją konstrukcyjną, weryfikację oraz symulację konstrukcji pod względem wytrzymałości i zachowania w różnych warunkach.

W zakres technologicznego przygotowania produkcji wchodzi planowanie i projektowanie procesów technologicznych, którego celem jest przygotowanie dokumentacji procesów produkcyjnych. W skład dokumentacji procesów będzie wchodzić, m.in. [63, 65]: wybór rodzaju i kolejności realizacji operacji technologicznych, dobór obrabiarek i stanowisk pracy, parametryzacja procesów obróbkowych oraz opis planu obróbki lub operacji.

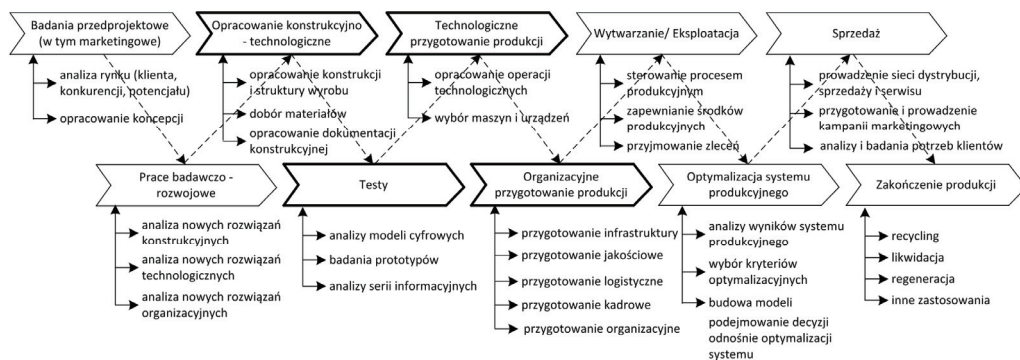
Celem organizacyjnego planowania produkcji (OPP) jest przyporządkowanie zasobów produkcyjnych do zaplanowanych zadań i określenie zdolności produkcyjnych systemu produkcyjnego [187]. Do podstawowych funkcji organizacyjnego planowania produkcji zalicza się [11, 183, 187]:

- projektowanie struktury produkcyjnej, czyli sieci powiązań elementów systemu produkcyjnego w odniesieniu do danego okresu,
- programowanie produkcji, czyli określenie struktury asortymentowej i wielkości produkcji,
- planowanie produkcji, czyli wyznaczenie zdolności produkcyjnych poszczególnych stanowisk roboczych oraz zapasów materiałów potrzebnych do realizacji programów produkcji,
- harmonogramowanie produkcji – przypisanie dostępnych zasobów produkcyjnych do wykonania zadań z uwzględnieniem terminu ich realizacji.

Wszystkie opisane etapy procesu produkcyjnego z wyróżnionymi etapami technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji przedstawiono na rysunku 17.

Wymogi rynkowe, takie jak szybkie dostarczanie nowych lub ulepszonych wersji produktów, doprowadziły do konieczności maksymalnego skrócenia czasu wejścia produktu na rynek. Równocześnie rozwój technologii informatycznych, technik modelowania i symulacji komputerowej doprowadziły do powstania tzw. inżynierii współbieżnej (CE, ang. *Concurrent Engineering*), w której poszczególne fazy projektowania produktów i procesów przebiegają równolegle w wirtualnym środowisku komputerowym. CE oparta jest na trzech podstawowych zasadach [63, 65]:

1. Równoległym wykonywaniu zadań podczas projektowania produktu przez grupy pracownicze z różnych działów przedsiębiorstwa, co znacznie skraca czas realizacji przedsięwzięcia.



Rys. 17. Główne etapy procesu produkcji

2. Standaryzacji różnego rodzaju aspektów w procesie rozwoju produktu, przez co więcej czasu pozostaje zespołom projektowym na opracowywanie innowacji.

3. Integracji poszczególnych zadań z różnych części procesu projektowania oraz obszarów funkcjonalnych przedsiębiorstwa (zespoły interdyscyplinarne).

Niewątpliwą zaletą stosowania inżynierii współbieżnej jest skrócenie czasu technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji. Równoległa praca różnych zespołów projektantów wymaga od nich ścisłej współpracy i wspólnego rozwiązywania różnorodnych aspektów technicznych, technologicznych i organizacyjnych. W późniejszych fazach przekłada się to na większą niezawodność procesu produkcyjnego, lepszą jakość i wydajność, a także na mniejsze koszty produkcji [127, 212]. Jednak, aby było to możliwe, musi być spełnionych kilka warunków, do których należy m.in. [58, 64, 71, 141, 183]:

- Standaryzacja w zakresie wyrobów i procesów.
Standaryzacja wyrobów rozumiana jako kształtowe i rozmiarowe ujednocianie części, typizację i normalizację umożliwiającą zmniejszenie pracochłonności projektowania i wykonania. Standaryzacja procesów oznacza natomiast jednoznaczny sposób wykonywania czynności, ujednocnienie metod i czasu realizacji zadań. Wprowadzenie standaryzacji zapewnia utworzenie standardów, schematów postępowania, co umożliwi realizację zadań zawsze w ten sam sposób, o tej samej jakości i w tym samym czasie. Zapewnia to przewidywalność procesu, ogranicza zbędną różnorodność, łatwość stosowania, co przekłada się na efektywność procesu.
- Możliwość efektywnego wykorzystywania informacji o produktach i procesach.
Informacje powinny być dostępne zarówno we wszystkich fazach rozwoju produktu i procesu, jak i dla wielu zespołów projektowych pracujących nad wspólnym rozwiązaniem, jednak w różnych systemach informatycznych i często w różnych geograficznie miejscach. Tutaj pojawia się problem zapisu i wymiany danych pomiędzy różnymi systemami informatycznymi, czyli ich integracji. Często w takich przypadkach do zapisu i wymiany danych używane są neutralne formaty wymiany danych,

tw. sprzęgi neutralne [72, 163, 192]. Innym rozwiązaniem są sprzęgi znormalizowane, możliwe do stosowania w wielu systemach komputerowych. Najbardziej znanym sprzęgiem znormalizowanym, będącym zarazem normą w modelowaniu produktów i procesów, jest norma ISO 1030 zwana także standardem STEP (ang. *Standard for the Exchange of Product Model Data*). Standard ten definiuje reguły zapisu i wymiany danych modelu produktu oparte na danych geometrycznych, topologicznych, technologicznych, materiałowych i wprowadza standaryzację we wszystkich obszarach funkcjonalnych przedsiębiorstwa [63, 64].

- Zarządzanie wiedzą w przedsiębiorstwie.
Zarządzanie wiedzą ma wiele definicji, jednak w uproszczeniu można je scharakteryzować jako umiejętność przedsiębiorstwa zdobywania, analizowania i wykorzystywania wiedzy w celu podejmowania lepszych decyzji i osiągnięcia przewagi nad konkurencją. Cechą charakterystyczną w zarządzaniu wiedzą jest to, że może ona dotyczyć zarówno zarządzania samą informacją, jak i zarządzania ludźmi, ich doskonaleniem zawodowym czy też procesami odnoszącymi się do gromadzenia i udostępniania danych.
- Wykorzystywanie modeli cyfrowych na wszystkich etapach zarządzania produkcją.
Podstawową zaletą cyfrowych modeli produktów i procesów jest ich prostota w porównaniu z obiektami rzeczywistymi, z jednoczesnym uwzględnieniem elementów istotnych w ujęciu celu modelowania. Dzięki temu modele mogą być zrozumiałe dla osób z różnych organizacji lub jej obszarów funkcjonalnych. Uproszczenie rzeczywistości skraca również znacznie czas budowy modelu. Cyfrowy zapis modelu umożliwia jego równoczesne i niezależne wykorzystywanie przez różne osoby, na różnych etapach procesu produkcyjnego, a wyniki mogą być wykorzystywane podczas budowy następnych modeli.
- Otwartość na zmiany, współpracę z innymi podmiotami i poszukiwanie możliwości rozwoju.

Jeśli wymienione warunki są spełnione, to projektowanie i wdrażanie innowacji produktowych i organizacyjnych staje się możliwe, proces nanoszenia zmian jest szybki, istnieje też możliwość przetestowania planowanych działań w środowisku wirtualnym i naniesienia poprawek bez ingerencji w rzeczywisty system produkcyjny.

Rozwój technik informatycznych spowodował, że w literaturze coraz częściej pojawia się pojęcie cyfrowej fabryki (ang. *Digital Factory*), której główne cechy bazują na trzech elementach [66, 95, 140, 141]:

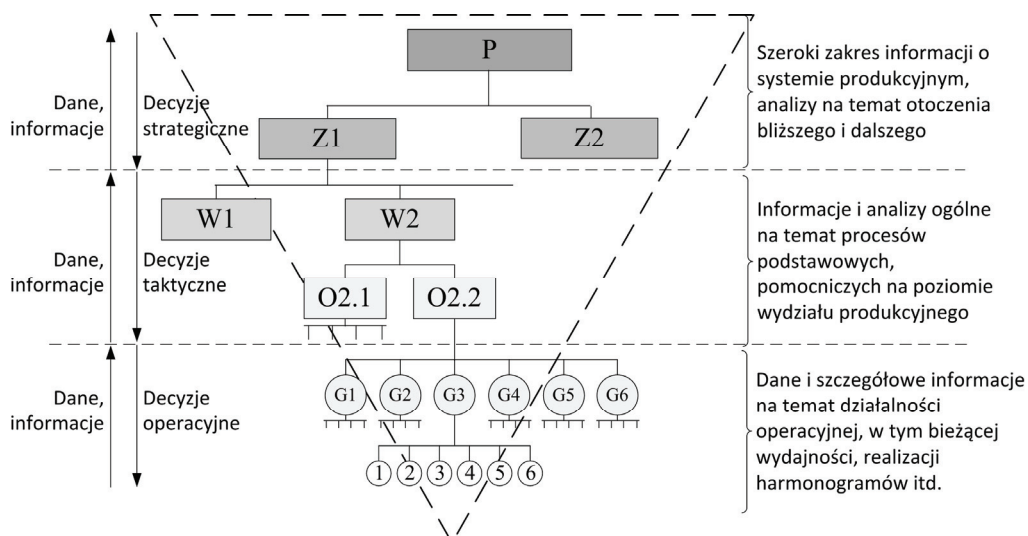
- modelach cyfrowych produktu, z jego statycznymi i dynamicznymi właściwościami,
- cyfrowym planowaniu produkcji i modelach systemów produkcyjnych,
- cyfrowej symulacji modeli przebiegu, z możliwością zastosowania danych planowanych dla ich poprawy.

Takie rozwiązania umożliwiają szybkie nanoszenie zmian i testowanie proponowanych rozwiązań przed podjęciem ostatecznej decyzji. Wytwarzanie cyfrowe przy-

czynia się do zmniejszania czasu rozwoju wyrobu i ryzyka z nim związanego, zmniejszania kosztów wytwarzania, wzrostu jakości wyrobów i szybszej reakcji na potrzeby rynku [95].

2.3.1. SYSTEMY INFORMATYCZNE W ZARZĄDZANIU PROCESAMI PRODUKCYJNYMI

Skuteczność realizacji rozwoju wyrobów zgodnie ze strategią CE wymaga sprawnego i efektywnego zarządzania informacją na wszystkich jego etapach. Również efektywne i skuteczne zarządzanie systemem produkcyjnym zależy od szybkiego podejmowania decyzji na wszystkich etapach produkcji i różnych poziomach zarządzania. Poszczególne szczeble zarządzania przedsiębiorstwem potrzebują odmiennych rodzajów informacji, co schematycznie przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Rodzaje informacji w zależności od szczebla zarządzania

Cykl życia produktu najczęściej jest rozumiany jako proces składający się z czterech etapów: projektowania, wytwarzania, sprzedaży i eksploatacji oraz utylizacji [63, 96, 163, 164]. Na każdym z tych etapów wykorzystywane są inne narzędzia informatyczne.

Na etapie projektowania wyrobu wykorzystywane są tzw. techniki CAx. Techniki CAx to zbiór metod i narzędzi takich, jak: CAD (ang. *Computer Aided Design*), CAM (ang. *Computer Aided Manufacturing*), CAE (ang. *Computer Aided Engineering*), CAP (ang. *Computer Aided Planning*), CAPP (*Computer Aided Process Planning*),

CAQ (ang. *Computer Aided Quality Control*), PPC (ang. *Production Planning and Control*) i innych, które tworzą zintegrowane środowisko komputerowego wspomaganie prac inżynierskich dla przedsiębiorstw produkcyjnych – CIM (ang. *Computer Integration Manufacturing*). Głównie dzięki normalizacji, standaryzacji, parametryzacji oraz standardowi STEP środowisko informatyczne systemów CAx umożliwia budowę zintegrowanych modeli produktów, procesów i środków produkcji [52,63]. Generowane na tym etapie dane i procesy są często wspierane przez systemy służące do przechowywania i aktualizacji danych o produktach PDM (ang. *Product Data Management*) oraz i ich następcę – systemy PLM (ang. *Product Lifecycle Management*), które dodatkowo wyposażone są w funkcje zarządzania jakością oraz rynkową ocenę produktów. Systemy PLM kontrolują konfiguracje produktu, zarządzają rozwojem, modyfikacją, korzystając z danych opisujących produkt.

Rolą systemu PLM jest również integracja systemów inżynierskich CAx z systemami odpowiadającymi za zarządzanie drugą fazą rozwoju produktu – wytwarzania. Na tym etapie najczęściej w przedsiębiorstwach produkcyjnych wykorzystywane są systemy ERP (ang. *Enterprise Resource Planning*) oraz systemy MES (ang. *Manufacturing Execution System*), a także systemy ASP (ang. *Advanced Planning and Scheduling Systems*). Rolą systemu ERP, na etapie wytwarzania produktu, jest zarządzanie i automatyzacja zadań związanych z potrzebami materiałowymi i zasobami produkcyjnymi. Oczywiście zadaniem tych systemów jest również integracja i wspieranie najważniejszych dziedzin funkcjonowania przedsiębiorstwa. Za najważniejsze dziedziny uważa się tu produkcję, księgowość, dystrybucję i logistykę, zarządzanie zasobami, gospodarkę materiałową i marketing. Podstawowym zadaniem systemu MES jest natomiast sterowanie procesem produkcyjnym na podstawie szczegółowych i aktualnych danych produkcyjnych pochodzących z układów sterowania i systemów akwizycji danych oraz raportowanie aktualnego stanu realizacji zleceń produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Rolą systemów ASP jest realizacja funkcji planowania krótkoterminowego oraz harmonogramowania na podstawie zaawansowanych algorytmów, których często brakuje systemom ERP [17, 70, 93, 131].

Ponieważ produkty powstają coraz częściej w ramach ścisłej współpracy z klientem, również w trzeciej fazie cyklu życia produktu – sprzedaży i eksploatacji – funkcjonują systemy informatyczne. Tutaj najczęściej wykorzystywanymi systemami informatycznymi są systemy, w których odbywa się zarządzanie relacjami z klientami CRM (ang. *Customer Relationship Management*) oraz systemy zarządzania łańcuchem dostaw SCM (ang. *Supply Relationship Management*). Również na tym etapie cyklu życia produktu, system PLM powinien pełnić funkcje integrujące pomiędzy systemami CRM, SCM oraz systemami MES i innymi systemami stosowanymi przez działy serwisu i sprzedaży [103, 131].

Do przyspieszenia prac w zakresie rozwoju produktów i procesów niewątpliwie przyczynia się rozwój technologii informatycznej. Skala uzyskiwanych efektów zależy od sprawności powiązań informacyjno-decyzyjnych fazy technicznego przygotowania produkcji z zarządzaniem systemem produkcyjnym. W tabeli 2 przedstawiono wybrane funkcje opisanych systemów informatycznych.

Tabela 2. Wybrane funkcje systemów informatycznych wykorzystywanych na różnych etapach cyklu „życia” wyrobu [9, 17, 63, 93, 127, 140, 164, 187]

Nazwa systemu	Główne funkcje systemu
CAD Systemy komputerowego wspomaganie projektowania	Geometryczne modelowanie obiektów Opracowywanie dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej Generowanie list materiałowych
CAM Systemy komputerowego wspomaganie wytwarzania	Generowanie i aktywizowanie programów NC
CAE Systemy komputerowego wspomaganie prac inżynierskich	Analiza sztywności i wytrzymałości konstrukcji Symulacja procesów zachodzących w zaprojektowanych układach
CAP/CAPP Systemy komputerowego wspomaganie planowania	Opracowywanie procesu technologicznego obróbki, montażu i kontroli Wspomaganie prac związanych z programowaniem urządzeń sterowanych numerycznie
CAQ Systemy komputerowego wspomaganie sterowania jakością	Ocena jakości produktu i procesów jego wytwarzania we wszystkich fazach jego projektowania
PPC Systemy planowania i sterowania produkcją	Planowanie i sterowanie realizacji zleceń produkcyjnych Planowanie zaopatrzenia materiałowego Planowanie i sterowanie obciążeniami stanowisk pracy Kontrola produkcji w toku
PDM/PLM Systemy zarządzania cyklem życia produktu	Przechowywanie i aktualizacja danych o produkcie Wymiana danych inżynierskich w procesie rozwoju produktu Projektowanie produktu Projektowanie wytwarzania Zarządzanie jakością Rynkowa ocena produktu Kontrola cyklu życia produktu
ERP Systemy zarządzania zasobami przedsiębiorstwa	Alokacja zasobów finansowych, ludzkich i rzeczowych Śledzenie kosztów Wykonanie budżetów Księgowanie Wykonanie planów sprzedaży Przyjmowanie zamówień Dokumentowanie kontaktów z klientem
	Realizacja zamówień Stany magazynów Raporty MRP Harmonogramy produkcji Raportowanie produkcji

<p style="text-align: center;">MES Systemy realizacji produkcji</p>	<p>Koszty bieżące materiałów i odpadów Bieżąca produktywność pracowników Bieżąca dostępność parku maszynowego Aktualny stan realizacji zamówień Aktualny poziom magazynów produkcyjnych Zarządzanie wykonaniem produkcji Zarządzanie instrukcjami stanowiskowymi Informacje o przestojach na produkcji Bieżące dane na temat efektywności Śledzenie produkcji</p>
<p style="text-align: center;">CRM Systemy zarządzania relacjami z klientem</p>	<p>Zarządzanie kontaktami z klientem Przechowywanie informacji o klientach Obsługa indywidualnych potrzeb i wartości dla klienta Przygotowywanie informacji dla klientów</p>
<p style="text-align: center;">SCM Systemy zarządzania łańcuchem dostaw</p>	<p>Zarządzanie łańcuchem dostaw Synchronizacja zaopatrzenia, produkcji, zapasów i transportu Definiowanie ograniczeń istniejących sieci dostaw Planowanie popytu</p>

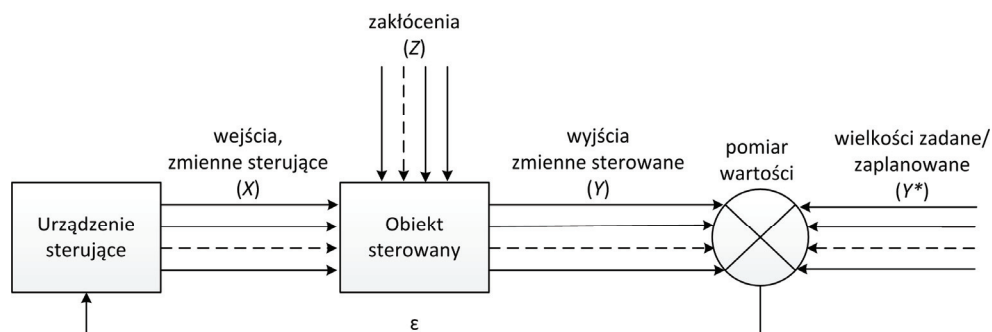
Integracje systemów informatycznych wykorzystywanych na różnych etapach cyklu życia wyrobu, można rozpatrywać na 3 płaszczyznach [44]:

- integracji funkcjonalnej, rozumianej jako możliwość wykorzystywania wyników pracy jednych podsystemów przez inne; integracja funkcjonalna możliwa jest dzięki wspólnym modelom danych o wyrobie, procesach i zasobach,
- integracji informacyjnej, polegającej na przekazywaniu wyników jednego systemu informatycznego do drugiego,
- integracji kompleksowej, polegającej na współpracy systemów informatycznych współpracujących ze sobą przedsiębiorstw.

2.4. STEROWANIE SYSTEMEM PRODUKCYJNYM

Sterowanie (ang. *control*) jest to celowe oddziaływanie jednego obiektu (sterującego) na drugi obiekt (sterowania) w celu otrzymania pożądanych zmian przebiegu procesu zachodzącego w obiekcie sterowania [24]. Obiektem sterowania może być nie tylko urządzenie techniczne, ale również złożony proces lub system niekoniecznie o naturze technicznej. Wówczas sterowanie jest to takie oddziaływanie (wpływanie) na przebieg procesu lub sposób funkcjonowania systemu, które zapewnia osiągnięcie założonych celów lub parametrów. Niezbędna jest wówczas informacja na temat wielkości sterowanych i przewidywania przebiegu procesu. Pojęcia te oznaczają podej-

mowanie decyzji na podstawie informacji lub danych o obiekcie sterowania. Na rysunku 19 przedstawiono opisany schemat układu sterowania.



Rys. 19. Schemat układu sterowania

Istota sterowania polega na tym, że urządzenie sterujące zmienia wartości wejść (X) do obiektu sterowanego w zależności od wielkości różnicy pomiędzy odczytanymi wartościami pomiarów wyjść (Y) a wartościami zadanymi lub zaplanowanymi (Y^*). Celem sterowania jest, aby różnica ta była bliska zeru przy działających na obiekt sterowany zakłóceniach (Z), co można zapisać następująco [24]:

$$\varepsilon(t) = Y^*(t) - Y(t); \quad \varepsilon(t) \rightarrow 0 \quad (2)$$

Można zatem stwierdzić, że w wyniku oddziaływania czynników zakłócających, spowodowanych zmiennością otoczenia systemu, system ulega stopniowej dezorganizacji, a przez to przestaje realizować założone cele, dla których został zaprojektowany i zorganizowany. W dłuższym okresie powstaje potrzeba sterowania systemem, aby ponownie dostosować go do zmiennych warunków otoczenia oraz reorganizacji systemu.

Należy jednak pamiętać, że systemy produkcyjne nie mają charakteru jedynie technicznego. Jednym z podstawowych elementów w systemach produkcyjnych są ludzie (tzw. podsystem społeczny), a celem, dla którego są projektowane i organizowane, jest zysk (tzw. podsystem ekonomiczny). Dlatego zarządzanie tak złożonymi i zróżnicowanymi układami jest rozumiane jako cztery podstawowe funkcje: planowanie, organizowanie, sterowanie (motywowanie) i kontrolowanie, a w podejmowaniu decyzji odnośnie do realizacji zaplanowanych celów pod uwagę brane są również dwie zasady gospodarności związane ze sposobem gospodarowania zasobami. Zasady te można następująco odnieść do systemu produkcyjnego:

1. Zasada maksymalizacji zysku polegająca na tym, że przy danych zasobach systemu produkcyjnego (X) przedsiębiorstwo produkcyjne chce osiągnąć jak największą produkcję (Y), czyli:

$$X = \text{const}, Y \rightarrow \max \quad (3)$$

2. Zasada minimalizacji środków polega na tym, że przedsiębiorstwo produkcyjne chce osiągnąć założoną wielkość produkcji (Y), zużywając na to jak najmniej zasobów (X), czyli:

$$X \rightarrow \min, Y = \text{const} \quad (4)$$

Mając na uwadze zasady gospodarności, sterowanie produkcją będzie się sprowadzało do takiego oddziaływania na system produkcyjny, aby osiągnął zaplanowane efekty. Przez oddziaływanie na system produkcyjny rozumie się podejmowanie decyzji odnośnie do wielkości, rodzajów lub parametrów wejść do systemu. Natomiast uzyskane efekty oznaczają wartości i rodzaje wyjść z systemu zgodnie z zaplanowanymi w planach produkcji. Innymi słowy, sterowanie produkcją oznacza podejmowanie decyzji o wejściach do systemu na podstawie odczytanych różnic między planem produkcji a wartościami rzeczywistymi wyjść z systemu produkcyjnego.

Tak jak planowanie produkcji odbywa się na różnych poziomach organizacyjnych (strategicznym, taktycznym i operacyjnym), tak samo sterowanie produkcji wiąże się z analogicznymi decyzjami podejmowanymi na różnych szczeblach organizacji i w różnym czasie. W zarządzaniu produkcją szczególnie ważne są plany zagregowane, plany produkcji oraz plany operacyjne zapisywane często w postaci harmonogramów produkcji. Opracowanie ich jest szczególnie istotne w warunkach zmiennego i nieprzewidywalnego otoczenia, z którego pochodzą liczne czynniki zakłócające przebieg procesu, zwłaszcza znaczenia nabiera podstawowe zadanie sterowania produkcją, czyli zapewnienie stabilności przebiegu procesów produkcyjnych.

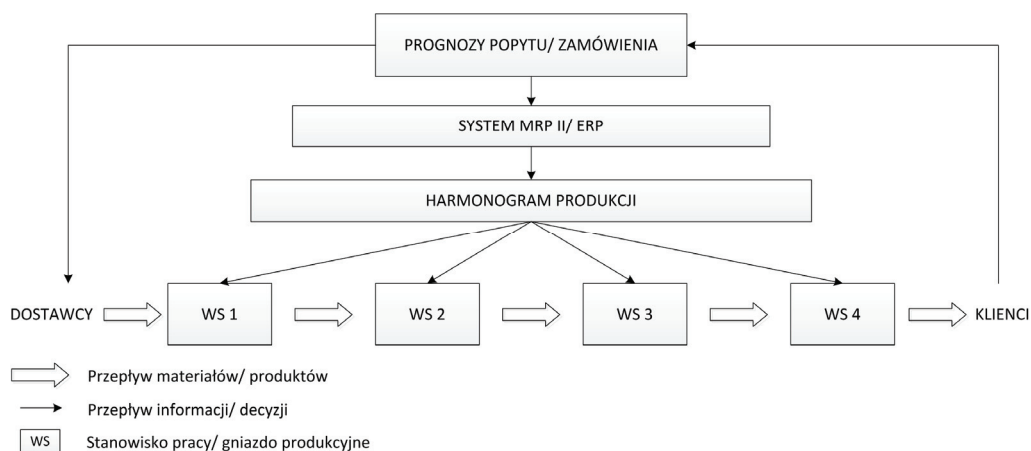
Sterowanie produkcją nie może odbywać się według przypadkowych reguł. Musi być oparte na określonych metodach i algorytmach postępowania. Wybór metody zależy od wielu czynników zewnętrznych i wewnętrznych, do których zalicza się między innymi wielkość popytu, rodzaj produkcji, zdolność produkcyjna i rodzaj zasobów produkcyjnych. W zależności od tych czynników przedsiębiorstwa stosują zazwyczaj trzy typy sterowania procesem produkcyjnym: pchający (ang. *push*), ssący (ang. *pull*) i wyciskający (ang. *squeeze*). Podstawowym elementem różniącym te trzy typy sterowania jest struktura i proces przepływu informacji w procesie wytwórczym, co ma bezpośredni wpływ na przepływ materiałów. Wszystko to składa się na podstawowy miernik systemu produkcyjnego, czyli produktywność wyrażaną w osiągniętych efektach w stosunku do poniesionych nakładów.

2.4.1. SYSTEMY PCHAJĄCE

Ten typ sterowania cechuje większość przedsiębiorstw produkcyjnych. Opiera się on na systemie MRP (ang. *Manufacturing Resources Planning*) lub obecnie ERP. Głównym elementem sterującym wielkością produkcji jest prognoza popytu na produkty lub wielkość zamówień. Na tej podstawie sporządzany jest harmonogram produkcji, uwzględ-

niający takie elementy, jak zdolności produkcyjne i logistyczne oraz potrzeby materiałowe wynikające ze struktury planowanych do wytworzenia produktów. Cechą charakterystyczną dla systemów pchających, oprócz harmonogramów produkcji, jest produkcja w seriach i partiach oraz utrzymywanie zapasów bezpieczeństwa [50].

Wielkość i rodzaj produkcji planowana jest z wyprzedzeniem poprzez budowę harmonogramu produkcji, w którego budowie uwzględnia się większość informacji zawartych w poszczególnych modułach systemu MRP II/ ERP. Następnie produkcja „przepychana” jest przez poszczególne operacje procesu produkcyjnego, aż do magazynu wyrobów gotowych, a następnie do klienta. Na rysunku 20 przedstawiono schemat funkcjonowania systemu pchającego.



Rys. 20. Schemat funkcjonowania systemu pchającego

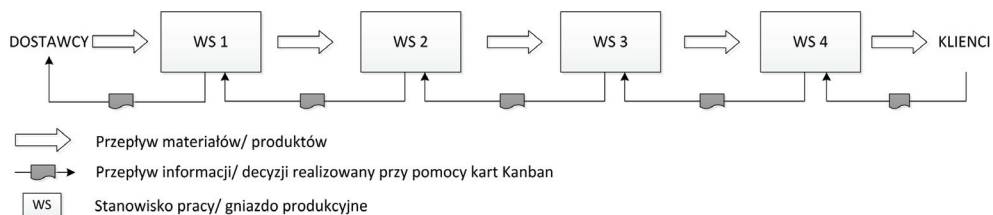
Systemy pchające, mimo iż stanowią większość w systemach produkcyjnych, charakteryzują się dużą wrażliwością na zakłócenia wynikające głównie ze zmian popytu i zmian terminów realizacji zamówień [182].

2.4.2. SYSTEMY SSĄCE

Wywodzą się z koncepcji szczupłej produkcji (ang. *Lean Production*) opracowanej przez firmę Toyota. Do ssącego systemu zarządzania produkcją potrzebne są trzy dobrze funkcjonujące komponenty [3, 50, 162]:

- sieć dobrze zorganizowanych, pewnych dostawców części i komponentów do produkcji,
- sterowanie przepływem materiałów w procesie wytwórczym według koncepcji Kanban,
- efektywne metody kontroli jakości.

Sposób funkcjonowania systemu ssącego sterowanego za pomocą kart Kanban, schematycznie przedstawiono na rysunku 21.

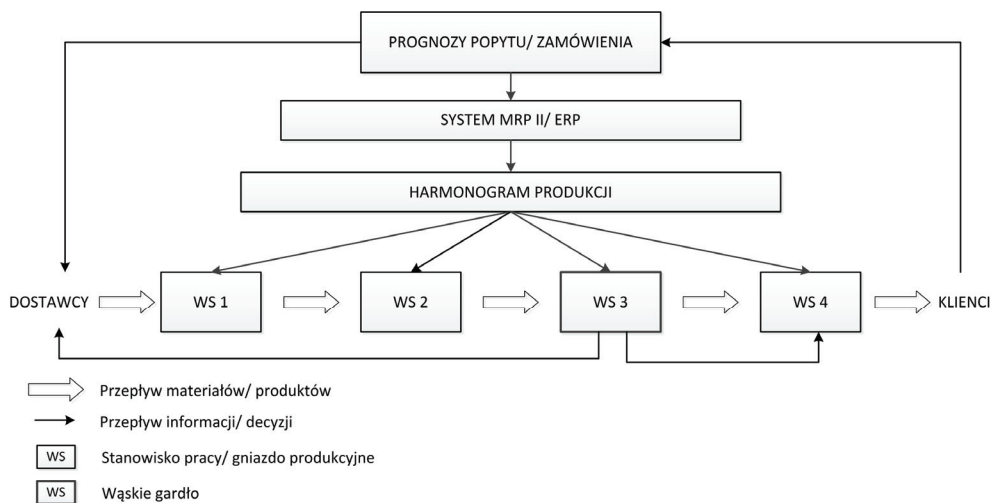


Rys. 21. Schemat funkcjonowania systemu ssącego

Systemy typu ssącego stosowane są głównie w przemyśle motoryzacyjnym oraz elektronicznym. Ze względu na możliwość szybkiego i elastycznego reagowania na zmiany popytu oraz na niski poziom zapasów systemy te zyskują coraz większą popularność w przemyśle, a techniki *Lean Production* przenoszone są na inne dziedziny niż produkcja. Przykładem są techniki *Lean Office* lub próby adaptacji i implementacji technik Lean w górnictwie (ang. *Lean Mining*) [30].

2.4.3. SYSTEMY WYCISKAJĄCE

Systemy te korzystają z teorii ograniczeń (ang. *Theory of Constraints*) znanej w środowisku zarządzania produkcją jako zsynchronizowane wytwarzanie [11, 199]. W literaturze [11, 43, 63, 187, 199] systemy te traktowane są jako zachodni odpowiednik systemów ssących.



Rys. 22. Schemat funkcjonowania systemu wyciskającego

System OPT (ang. *Optimized Production Technology*) za nadrzędne w sterowaniu produkcją przyjmuje sterowanie wąskim gardłem. Elementem synchronizującym tem-

po produkcji jest wydajność wąskiego gardła, które wyznacza tempo pracy dla stanowisk przed nim oraz za nim [133, 199]. Sposób funkcjonowania systemu wyciskającego przedstawiono schematycznie na rysunku 22.

Możliwości produkcyjne wąskiego gardła, będącego zasobem krytycznym, decydują zarówno o wielkości partii produkcyjnej, jak i o częstotliwości dostaw materiałów. W celu zabezpieczenia ciągłości produkcji często stosuje się różne wielkości partii produkcyjnej i transportowej w systemie produkcyjnym oraz bufory z zapasami elementów przed stanowiskiem będącym wąskim gardłem [11].

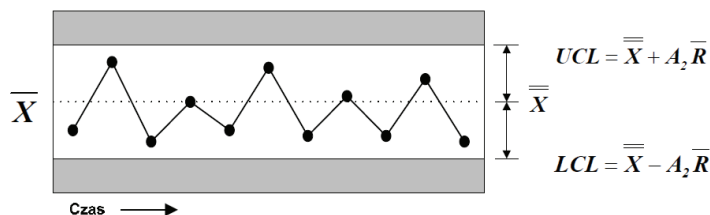
Wszystkie współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne stoją przed problemem sposobu planowania i sterowania wielkości produkcji, gdyż większa zdolność produkcyjna niż popyt powoduje znaczący wzrost kosztów produkcji związany ze wzrostem poziomu zapasów. Zbyt mała wydajność powoduje z kolei niewystarczające wykorzystanie posiadanych zasobów i utratę klientów, którzy nie mogli kupić produktu. Dzięki wyborowi odpowiedniej metody sterowania produkcją możliwe jest odpowiednie zaplanowanie potrzeb materiałowych i komponentów dostarczanych przez poddostawców na potrzeby realizacji zleceń produkcyjnych. Jest to szczególnie ważne w przypadku wyrobów złożonych z kilkuset i więcej części, produkowanych w małych partiach. Odpowiednie planowanie i sterowanie może zmniejszyć koszty magazynowania, a przez to koszty produkcji. Inną funkcją sterowania jest bieżące reagowanie na zakłócenia pojawiające się w systemie produkcyjnym. W tym przypadku funkcja ta łączy się z funkcją monitorowania (kontroli) podstawowych parametrów procesu produkcyjnego i polega na korygowaniu w porównaniu z planem produkcji.

2.5. ZASTOSOWANIE KART KONTROLNYCH W STEROWANIU PROCESAMI PRODUKCYJNYMI

Jedną z metod, którą można zastosować w monitoringu, kontroli, a następnie sterowaniu systemem produkcyjnym, są karty kontroli procesów, które należą do grupy narzędzi wykorzystywanych w statystycznym sterowaniu procesem (SPC, ang. *Statistical Process Control*). Do najbardziej znanych należą karty kontrolne Shewharta, które znajdują zastosowanie w systemach Six Sigma [69, 90, 148].

Karta kontrolna obrazuje dane bądź podzbiory danych, najczęściej w funkcji czasu lub numeru próbki i linię centralną pokazującą ogólną wartość średnią tych danych. Granice kontrolne są liniami pokazującymi granice naturalnej zmienności, gdzie UCL (ang. *Upper Control Limit*) to górna linia kontrolna, natomiast LCL (ang. *Lower Control Limit*) to dolna linia kontrolna. Linie kontrolne są zazwyczaj umieszczone w odległości trzech odchyłeń standardowych (3σ) od linii centralnej [121].

Obserwacje, które pochodzą z procesu stabilnego, mieszczą się w granicach kontrolnych, natomiast wynik danej obserwacji pojawiający się poza obszarem stabilności jest sygnałem potwierdzającym wystąpienie zmienności. Na rysunku 23 przedstawiono przykład karty kontrolnej Shewharta, gdzie \bar{X} – wartość średnia z próby, $\bar{\bar{X}}$ – wartość średnia z wartości średnich w poszczególnych próbach, A_2 – współczynnik statystyczny, \bar{R} – wartość średnia rozstępu.



Rys. 23. Przykład karty kontrolnej [29]

U podstaw SPC leży założenie, że każdy proces poddawany jest oddziaływaniom dwóch rodzajów czynników [90]:

- Normalnych (systemowych) – nierozdzielnie związanych z procesem (np. wibracja urządzeń, zmienna temperatura, wilgotność, stopień zapylenia itd.).
- Szczególnych – oddziałujących na proces o charakterze losowym, nazywanych także czynnikami ryzyka (np. awarie urządzeń, absencja pracowników, opóźnienia dostawców itd.).

Na skutek oddziaływania tych czynników w procesach występują dwa rodzaje zmienności: naturalna i nadzwyczajna. Naturalna zmienność procesu spowodowana jest występowaniem przyczyn systemowych i wówczas punkty reprezentujące wyniki pomiarów znajdują się wewnątrz linii kontrolnych wykresu. W przypadku oddziaływania czynników ryzyka (zmienność nadzwyczajna) punkty reprezentujące pomiary mogą znaleźć się poza liniami kontrolnymi [90, 148].

Podstawowym zadaniem w sterowaniu procesem wytwórczym jest ograniczenie jego zmienności do zmienności naturalnej. Najlepiej jeśli odbywa się to przez wykrycie i wyeliminowanie wpływu czynników ryzyka. W przypadku, kiedy nie jest to możliwe, rolą sterowania jest odpowiednia zmiana wielkości parametrów wejściowych (np. zwiększenie liczby pracowników, środków transportu itd.), tak aby system pozostawał stabilny.

W niniejszej pracy proponuje się zastosowanie idei kart kontrolnych do analizowania, a następnie sterowania procesem produkcyjnym. Jednak uważa się, że zarówno dolna, jak i górna linia kontrolna powinna być każdorazowo określana we wzorcu będącym planem produkcji. Decyzja o wyznaczeniu granic dozwolonej zmienności procesu powinna należeć do osób zarządzających procesem i powinna być uzależniona od specyfiki procesu produkcyjnego.

2.6. WNIOSKI

Tendencje rozwojowe współczesnych systemów produkcyjnych zmierzają w stronę produktów i procesów innowacyjnych, a czas życia produktów ulega znacznemu skróceniu [100, 205]. Współczesny klient wybiera produkty innowacyjne, charakteryzujące się wieloma funkcjami użytkowymi. Coraz bardziej liczy się czas dostarczenia produktu na rynek. Przedstawione w rozdziale tendencje rozwojowe mają wpływ na budowę i cechy współczesnych przedsiębiorstw. Zmienia się również sposób zarządzania, które z jednej strony koncentruje się na zapewnieniu szybkiego rozwoju i nadszyciu za zmianami na rynku, a z drugiej strony musi koncentrować się na zapewnieniu stabilności realizacji podstawowych procesów. Podejmowanie decyzji odnośnie do systemu produkcyjnego, niezależnie od poziomu organizacyjnego, na którym są podejmowane, coraz częściej poprzedzane są budową modeli, na których następuje testowanie wariantów decyzyjnych. Takie podejście nie tylko skraca czas dostarczania nowych lub ulepszonych produktów na rynek, ale również wpływa na większą stabilność systemu produkcyjnego.

W tym kontekście modelowanie systemów produkcyjnych staje się popularnym narzędziem wykorzystywanym w zarządzaniu. Pomimo iż literatura proponuje opisy i charakterystykę wielu metod modelowania, to widoczny jest brak opracowań szeroko traktujących to zagadnienie i odnoszących się do modelowania systemów wytwórczych. W kolejnym rozdziale scharakteryzowane zostaną najpopularniejsze rodzaje modeli wykorzystywane w zarządzaniu systemami produkcyjnymi. Wszystkie prezentowane typy modeli zostaną zilustrowane przykładami praktycznymi oraz porównane pod względem wybranych kryteriów. W celu łatwiejszego wyboru typu modelu do problemu decyzyjnego zestawiono charakterystyczne dane wejściowe i wyjściowe w podsumowaniu poszczególnych rozdziałów.

3. MODELOWANIE SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

W rozdziale opisano role, cele i rodzaje modeli wykorzystywanych najczęściej w podejmowaniu decyzji i zapewnianiu stabilności planowanych lub reorganizowanych systemów produkcyjnych. Scharakteryzowano grupę modeli schematycznych, w której wyróżniono schematy blokowe, mapy i modele procesów zapisanych w notacjach procesów biznesowych takich, jak IFEF0 i BPMN. Każdy rodzaj modelu zilustrowano przykładem praktycznym pochodzącym z rzeczywistego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Drugą część rozdziału poświęcono modelom symulacyjnym systemów produkcyjnych. Przedstawiono charakterystykę modeli symulacyjnych, związane z nimi pojęcia i zakresy zastosowań w zarządzaniu systemami produkcyjnymi. Zaprezentowano etapy i sposób budowy modelu symulacyjnego, kryteria wyboru programu do modelowania i symulacji oraz wady i zalety symulacji komputerowej. Możliwość zastosowania modeli symulacyjnych w reorganizacji systemów produkcyjnych przedstawiono na dwóch przykładach praktycznych – w reorganizacji linii produkcyjnej wiązek elektrycznych i w reorganizacji zakładu produkującego ramy wózków dla taboru kolejowego. Rozdział kończy się porównaniem prezentowanych metod modelowania ze względu na wybrane kryteria oraz zestawieniem danych wejściowych i wyjściowych prezentowanych typów modeli.

Zmiany na globalnym rynku spowodowane wzrostem konkurencji i skróceniem cyklu życia produktu wymusiły na producentach między innymi częste zmiany asortymentu produkcji, dostarczanie nowych i innowacyjnych wyrobów oraz krótkie terminy realizacji zamówień. Otoczenie przedsiębiorstw stało się bardzo zmienne i dynamiczne, a utrzymanie się na rynku wymaga podejmowania szybkich decyzji z równoczesnym przewidywaniem ich skutku. W odpowiedzi przedsiębiorstwa musiały radykalnie zmienić metody i techniki projektowania wyrobów oraz zarządzania procesami produkcyjnymi, tak aby z jednej strony podążać za zmianami, a z drugiej zapewnić sprawne i stabilne funkcjonowanie przedsiębiorstwa. W tym celu powszechne staje się wykorzystywanie różnego typu systemów informatycznych oraz stosowanie współbieżnego projektowania wyrobów i procesów, jak i cyfrowego zarządzania systemami produkcyjnymi. Na wszystkich etapach projektowania, rozwoju i zarządzania systemami produkcyjnymi wykorzystywane są różnego typu cyfrowe modele procesów i produktów [83, 139, 206, 214]. Modele, będące uproszczonym odwzorowaniem rzeczywistości, umożliwiają z jednej strony ograniczenie stopnia złożoności, skomplikowania i oddziaływania z innymi elementami systemu rzeczywistego, z drugiej zaś strony zawierają wszystkie istotne elementy i cechy z perspektywy

celu badań. To z kolei ułatwia obniżenie poziomu niepewności, tym większej im badany obiekt jest bardziej skomplikowany, oraz skrócenie czasu podejmowania decyzji.

Działania na modelu, a nie na rzeczywistym systemie produkcyjnym, nie zaburzają stabilności procesów produkcyjnych. Traktowanie modelu jako duplikatu systemu rzeczywistego umożliwia m. in. przenoszenie wniosków z badań na modelu komputerowym na rzeczywisty system produkcyjny. Modelowanie i symulacja komputerowa umożliwia weryfikowanie wprowadzanych rozwiązań przed ich wdrożeniem, co nie jest możliwe w konwencjonalnym sposobie prowadzenia prac projektowych [31, 53]. Dodatkową zaletą jest redukcja kosztów przeprowadzanych zmian na podstawie przeprowadzonych symulacji na początku realizacji projektu. Zmiany przewidziane i zaplanowane na początku realizacji projektu kosztują znacznie mniej niż w późniejszych etapach, jak również w mniejszym stopniu zakłócają funkcjonowanie i stabilność systemu [191, 214].

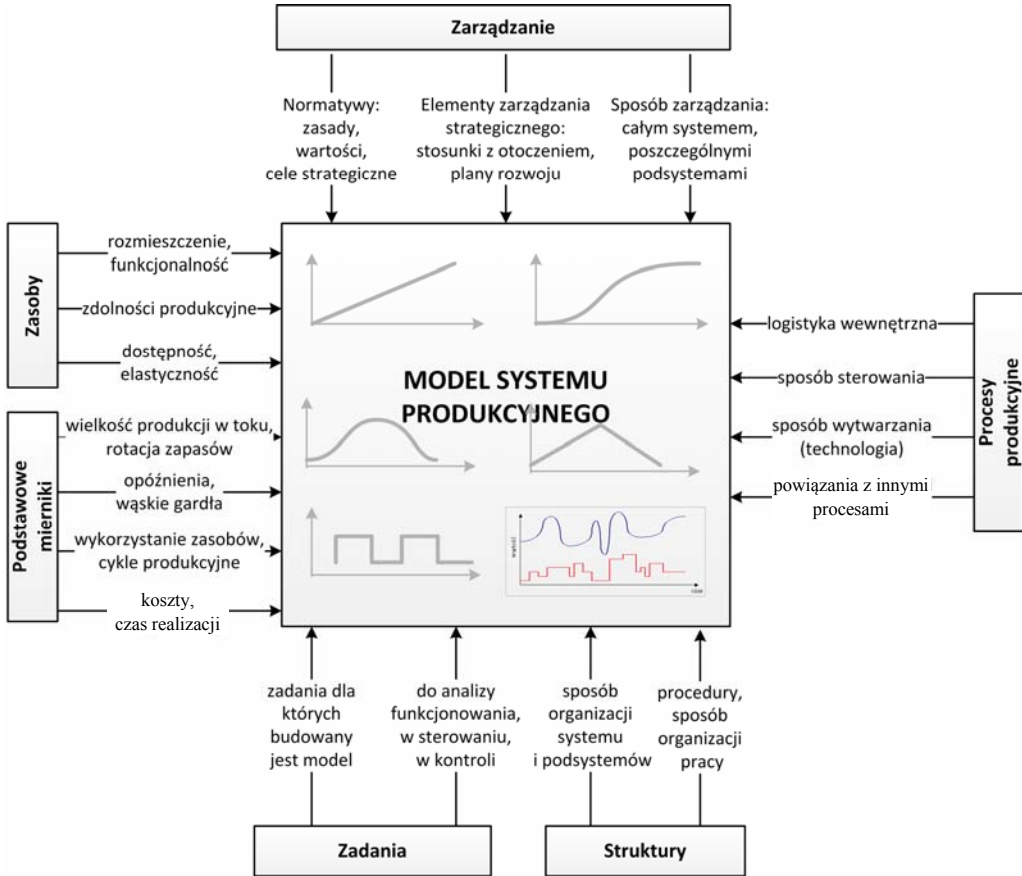
„Model stanowi odwzorowanie najistotniejszych cech badanego lub projektowanego przedmiotu z punktu widzenia zadania, któremu służy w określonej rzeczywistości lub abstrakcji” [79]. Modelowanie natomiast oznacza „działanie polegające na dobieraniu do oryginału możliwego do przyjęcia zamiennika zwanego modelem, czyli jest to przybliżone odtwarzanie najważniejszych właściwości oryginału” [92]. Według [102] modelowanie sprowadza się do „transformacji informacji o modelowanym obiekcie ze stanu potrzeb, żądań, wymagań i ograniczeń do stanu opisu struktury i relacji, która jest w stanie spełnić te wymagania”.

Przedstawione definicje modelowania wymagają dodatkowych wyjaśnień i uzupełnień [23, 83, 180]:

- Zdefiniowanie modelu danego systemu nie jest jednoznaczne. Dla tego samego systemu lub obiektu można zbudować modele różnego typu, w zależności od celu modelowania oraz od tego, jakie wielkości i zależności mają być analizowane.
- Przed rozpoczęciem modelowania systemu produkcyjnego należy najpierw dokonać jego analizy, czyli wybrać istotne elementy systemu i określić sposób ich powiązań, ustalić poziom, na którym będzie system analizowany oraz wybrać parametry, które będą go charakteryzowały. Aby to zrealizować, konieczne jest poznanie sposobu funkcjonowania systemu produkcyjnego. W tym celu zazwyczaj tworzy się najpierw opis słowny, a następnie stosuje się różne przybliżenia, uproszczenia i wprowadza symbole.
- Zwykle formalizuje się zależność skutku od przyczyny, czyli bada się zależność wielkości wyjściowych od wejściowych.

Aby według modelu można było podejmować właściwe decyzje, musi on zawierać odpowiednie do zakresu badań wymiary przedsiębiorstwa. W modelowaniu systemów produkcyjnych, bez względu na cel modelowania i przyjęte kryteria optymalizacyjne, najczęściej uwzględnia się sześć wymiarów przedsiębiorstwa: zarządzanie, struktury, zasoby, procesy produkcyjne, podstawowe mierniki wytwórcze oraz zadania systemu

produkcyjnego [4, 154, 215]. Na rysunku 24 przedstawiono wymienione wymiary wraz z najczęściej wykorzystywanymi elementami uwzględnianymi w modelowaniu procesów wytwórczych.



Rys. 24. Wielkości i zagregowany model przedsiębiorstwa produkcyjnego i ich wybrane komponenty uwzględniane zazwyczaj w modelowaniu systemów produkcyjnych

Celem modelowania jest z jednej strony sformalizowany opis problemu, z drugiej zaś takie przedstawienie zagadnienia, które uprości jego rozwiązanie. Modelowanie, jako metoda badań i rozwoju, opiera się na czterech głównych etapach [54]:

- Dostrzeganiu istotnych właściwości z perspektywy badanego obiektu rzeczywistego.
- Zbudowaniu poprawnego modelu, który w sposób konkretny, a zarazem uproszczony, będzie wiernie odwzorowywał badany system.

- Przeprowadzeniu eksperymentów na zbudowanym modelu oraz znalezieniu najlepszych rozwiązań dla wcześniej określonych kryteriów.
- Przeniesieniu wybranych rozwiązań do systemu rzeczywistego.

Literatura przedstawia różne klasyfikacje modeli. Powodem tego jest różnorodność problemów, jakie rozwiązuje się za pomocą modelowania. Najczęściej jednak modele dzielone są na trzy grupy w zależności od przyjętego kryterium klasyfikacyjnego, co przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Ogólny podział modeli [23, 79, 130, 134, 214]

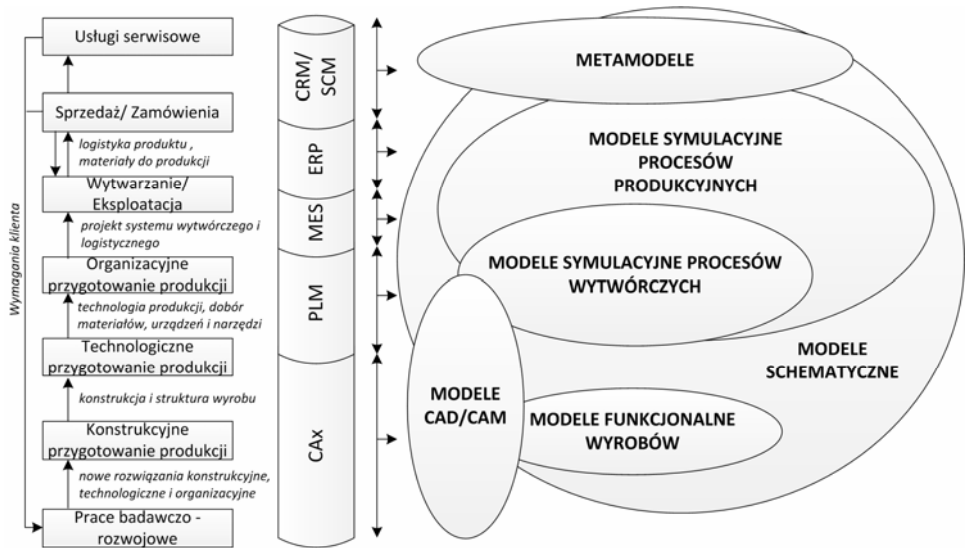
Grupa	Rodzaj modelu	Opis i przykłady
I (wygląd)	Fizyczne (materialne)	Odwzorowują w odpowiedniej skali i stopniu dokładności pewne cechy umożliwiające prowadzenie analiz i badań, np. model fizyczny produktu, samolotu, budynku itp.
	Schematyczne	Zapisywane w postaci diagramów, map i schematów, np. obieg dokumentacji w procesie produkcyjnym, przepływ materiałów na hali.
	Symboliczne	Oparte są na zapisie matematycznym oraz algorytmicznym. Modelem matematycznym systemu (obiektu, procesu) jest zestaw wzorów matematycznych określających zależności pomiędzy wyróżnionymi wielkościami [23]. Przykładem modelu symbolicznego jest model komputerowy, np. model symulacyjny systemu produkcyjnego.
II (czas)	Styczne	Pomijają udział czasu, albo opisują chwilowy stan systemu w pewnym momencie czasu.
	Dynamiczne	Podkreślają zjawisko upływu czasu. Procesy produkcyjne mają charakter dynamiczny.
III (rodzaj zmiennych)	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.
	Rozmyte	Występują w nich zmienne lingwistyczne oraz reguły operujące na zmiennych lingwistycznych.

W zarządzaniu systemami produkcyjnymi modelowania używa się podczas podejmowania decyzji, a rola modeli sprowadza się zazwyczaj do [8, 214]:

- poznania, uproszczenia lub wizualizacji złożonej rzeczywistości,
- projektowania nowego systemu produkcyjnego lub rozwoju istniejącego,
- optymalizacji i sterowania parametrami systemu produkcyjnego.

Na różnych poziomach i etapach zarządzania systemem produkcyjnym używa się różnych typów modeli [197]. Na poziomie strategicznym wykorzystywane są tzw. metamodele, opisujące przedsiębiorstwo na najwyższym poziomie ogólności. Metamodely zawierają specyfikację celu, planów, sposobów funkcjonowania, zasobów itd. Do najbardziej uniwersalnych i wykorzystywanych na wszystkich poziomach zarządzania wykorzystuje się modele schematyczne. Ich rola sprowadza się głównie do analizy problemu, wybrania elementów do dalszych prac

modelowych lub wyznaczenia schematu postępowania. Największą grupę stanowią modele symulacyjne, na których za pomocą komputerów można przeprowadzać eksperymenty symulacyjne i weryfikować planowane decyzje. Na rysunku 25 przedstawiono zastosowanie różnych typów modeli na różnych etapach zarządzania systemem produkcyjnym.

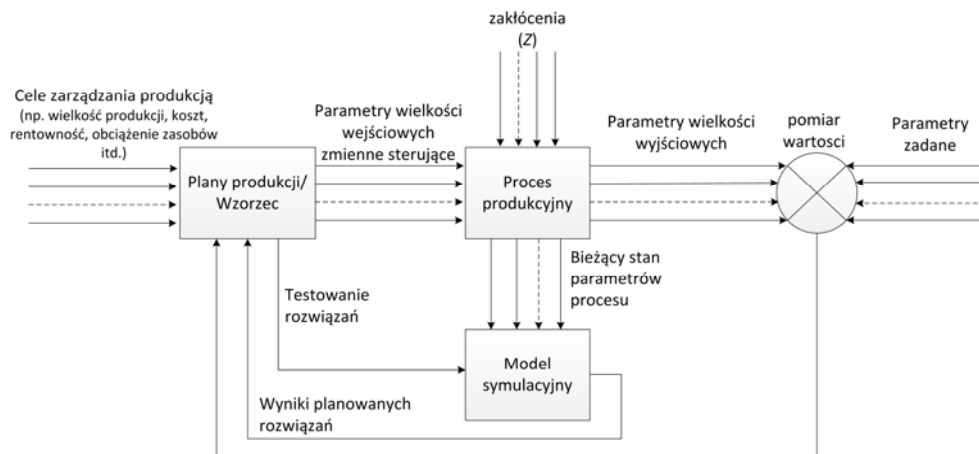


Rys. 25. Zastosowanie różnych typów modeli na wybranych etapach zarządzania systemem produkcyjnym

W zarządzaniu systemami produkcyjnymi wyróżnia się następujące cele budowy modeli [217]:

- projektowanie – model służy do optymalizacji struktury (konstrukcji) obiektu i jego parametryzacji. Jest narzędziem oceny jakości obiektu lub systemu i daje możliwość eliminacji słabych ogniw (modele funkcjonalne i niezawodnościowe);
- użytkowanie i sterowanie systemem – model jest wykorzystywany do analizy wariantów planowanych decyzji na temat systemu rzeczywistego. Przeprowadzona analiza wpływa na poprawę stabilności przebiegu procesów użytkowanego systemu lub umożliwia odpowiednie sterowanie nim;
- diagnozowanie – model ma posłużyć do ustalenia algorytmu diagnozowania, który określa postać obiektu.

W przypadku sterowania procesem produkcyjnym model systemu produkcyjnego służy weryfikacji decyzji na temat wielkości parametrów wejść do systemu. Dzięki zastosowaniu systemów informatycznych może on być na bieżąco zasilany danymi pochodzącymi z systemu produkcyjnego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów na modelu mogą pomóc podejmującemu decyzję w określeniu wartości parametrów wejść do systemu. Koncepcję sterowania systemem produkcyjnym z wykorzystaniem modelu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 26.



Rys. 26. Sterowanie procesem produkcyjnym z wykorzystaniem modelu symulacyjnego

Zagadnienie sterowania systemem produkcyjnym jest typowym przykładem analizy ilościowej, której celem jest wyznaczenie przebiegu czasowego wartości wyjść dla zadanych wartości wejść [23]. Drugim typem analizy spotykanym w literaturze, dla której budowane są modele, jest analiza jakościowa. Polega ona na zbadaniu czy system ma określone właściwości, np. czy dla stałych w czasie wejść do systemu jego wyjścia są stałe w czasie, czy zmieniają się rosnąco, czy malejąco [23]. W szczególności modele mają następujące zalety funkcjonalne [54]:

- umożliwiają badaczowi sprawdzenie swoich teoretycznych przekonań o systemie, dokonanie na nich doświadczeń, obserwacji oraz wyciągnięcie logicznych wniosków,
- ułatwiają zrozumienie systemu, ponieważ zmuszają decydenta do pełnego i ścisłego zdefiniowania systemu, problemu decyzyjnego oraz do uwzględnienia w modelu celów przedsiębiorstwa,
- dają możliwość zweryfikowania skutków podjętych decyzji, nie zaburzając bieżącego funkcjonowania systemu rzeczywistego,
- skłaniają do prowadzenia w przyszłości badań szczegółowych,
- przyspieszają wykonanie analizy,
- wymagają wykorzystywania danych różnego typu, pochodzących z różnych źródeł,
- zmniejszają koszty i ryzyko planowanych przedsięwzięć.

3.1. MODELE SCHEMATYCZNE SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Dużą grupę modeli, wykorzystywaną do analizy systemów produkcyjnych, stanowią modele schematyczne, zwane również graficznymi lub symbolicznymi. Modele te służą za-

zwyczaj zobrazowaniu analizowanego systemu w postaci grafów, diagramów, schematów i map. Budowa modelu polega na przekształceniu wiedzy o procesie na postać schematu, do którego rysowania wykorzystuje się zdefiniowany zestaw symboli (notacja, język graficzny). Główną zaletą modelowania graficznego jest możliwość opisu złożonych i skomplikowanych procesów na wielu poziomach szczegółowości w sposób bardziej precyzyjny i zrozumiały dla różnych osób w przedsiębiorstwie, niż za pomocą języka naturalnego.

Modele schematyczne mogą mieć bardzo różną postać. Wybór danego typu powinien zależeć od celu modelowania i tak zazwyczaj:

- schematy blokowe służą jedynie graficznemu przedstawieniu przebiegu procesu, umożliwiającą identyfikację elementów i ich relację w procesie,
- mapy procesów są budowane w celu porównania sposobu przebiegu procesu obecnie oraz po przeprowadzonych zmianach organizacyjnych,
- modele procesów biznesowych są najbardziej zaawansowaną postacią modeli schematycznych i często wykorzystywane są w procesie reorganizacji przedsiębiorstw lub w późniejszej budowie systemów informatycznych; w tym przypadku zazwyczaj na model procesu składa się wiele różnego typu schematów, w zależności od przyjętej metodyki modelowania.

Rola modeli schematycznych w zapewnianiu stabilności systemów produkcyjnych sprowadza się głównie do możliwości identyfikacji elementów i relacji w analizowanych procesach, identyfikacji problemów oraz analizy proponowanych rozwiązań przed ich wdrożeniem do systemu rzeczywistego. Wyniki z modeli schematycznych stanowią zazwyczaj podstawy dalszych, bardziej szczegółowych analiz.

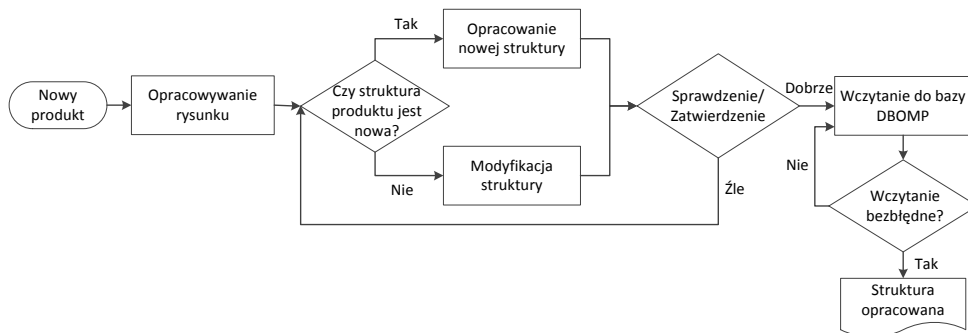
3.1.1. SCHEMATY BLOKOWE

Schemat blokowy nazywany jest często także schematem przepływu albo algorytmem. Jest on graficznym przedstawieniem przebiegu procesu jako ciągu działań, przepływu, informacji, przepływu materiałów itd. [98], identyfikuje ponadto czynności i pokazuje sposób powiązań pomiędzy nimi. Schematy blokowe ułatwiają zrozumienie problemu decyzyjnego i mogą być podstawą do prowadzenia dalszych analiz.

Przykład 1

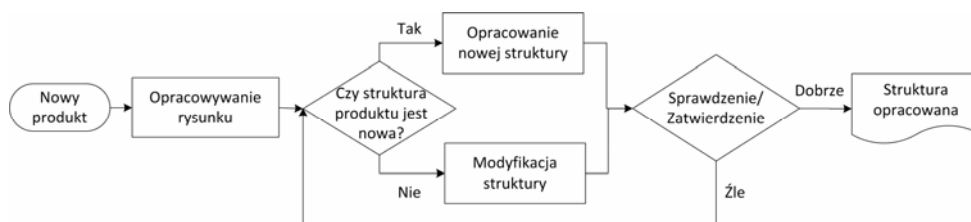
*Schemat blokowy opracowywania struktury produktu
przed i po wprowadzeniu elektronicznego obiegu informacji*

Celem budowy modeli schematów blokowych było zidentyfikowanie czynności w procesie rozwoju struktury produktu i oszacowanie korzyści z wprowadzenia elektronicznego obiegu informacji. Na rysunku 27 przedstawiono sposób wykonywania działań podczas opracowywania struktury produktu w jednej z dolnośląskich firm produkcyjnych przed wprowadzeniem systemu elektronicznego.



Rys. 27. Blokowy model procesu opracowywania struktury produktu przed wprowadzeniem elektronicznego obiegu informacji [62]

Na rysunku 28 przedstawiono schemat blokowy tego samego procesu opracowywania struktury produktu po wprowadzeniu systemu informatycznego PDM/TPM zarządzającego opracowywaniem dokumentacji technicznej.



Rys. 28. Blokowy model procesu opracowywania struktury produktu po wprowadzeniu elektronicznego obiegu informacji [62]

Zaletą budowy modeli schematów blokowych w prezentowanym przykładzie jest identyfikacja i możliwość porównania wykonywanych czynności w procesach. W dalszej kolejności można oszacować czas trwania obydwu procesów i przeanalizować korzyści z wprowadzenia elektronicznego systemu obiegu informacji.

3.1.2. MAPY PROCESÓW

Mapy procesów wykonywane są zazwyczaj w celu przedstawienia stanu obecnego procesu i pokazują sposób jego przebiegu na dzień sporządzenia mapy. Zapisanie analizowanego procesu w taki sposób odpowiada na pytanie „gdzie jesteśmy?”. Po analizie obecnego stanu, następnym krokiem jest zazwyczaj wykonanie mapy stanu przyszłego, pokazującej pożądaną stan przyszłych procesów. Celem budowy mapy stanu przyszłego jest odpowiedź na pytania o przyszły stan systemu produkcyjnego oraz

o możliwość realizacji założonych celów. Na mapach bardzo często procesy dzieli się na podstawowe i pomocnicze, wyznacza się ich właścicieli, wykonawców, osoby kontrolujące i zatwierdzające. Dodatkowo umieszcza się podstawowe mierniki, miary i parametry kluczowe dla procesów lub czynności. Dane te później wykorzystywane są do oceny ich realizacji [119].

Podobnie jak w przypadku schematów blokowych, mapy procesów, poprzez prosty i precyzyjny zapis graficzny ułatwiają identyfikację problemów. Mapy stanów przyszłych umożliwiają analizę wpływu proponowanych zmian organizacyjnych na system produkcyjny i są podstawą do prowadzenia dalszych, bardziej szczegółowych analiz.

Ze względu na dużą popularność filozofii Lean Production (LP) do mapowania procesów produkcyjnych często wykorzystuje się jedno z jej narzędzi – VSM (ang. *Value Stream Mapping*). Mapa VSM jest schematem graficznym procesu, pokazującym związek przepływu materiału z przepływem informacji [30]. „Metoda mapowania strumienia wartości (...) służy do odwzorowania przepływów materiałowych i informacyjnych w systemie produkcyjnym przedsiębiorstwa produkcyjnego. Stanowi ona zapis kolejnych kroków, które są podejmowane w procesie produkcji wyrobu (od surowca po wyrób gotowy). Zapis ten przyjmuje formę tzw. mapy strumienia wartości (mapy VSM), która opisuje zarówno przepływ materiałów (logikę kolejnych czynności produkcyjnych), jak również przepływ informacji (sposób, w jaki ujęte na mapie procesy produkcyjne są informowane o tym co produkować, kiedy oraz w jakiej ilości)” [176].

Przykład 2

Mapa VSM dla procesu produkcyjnego lampki sygnalizacyjnej

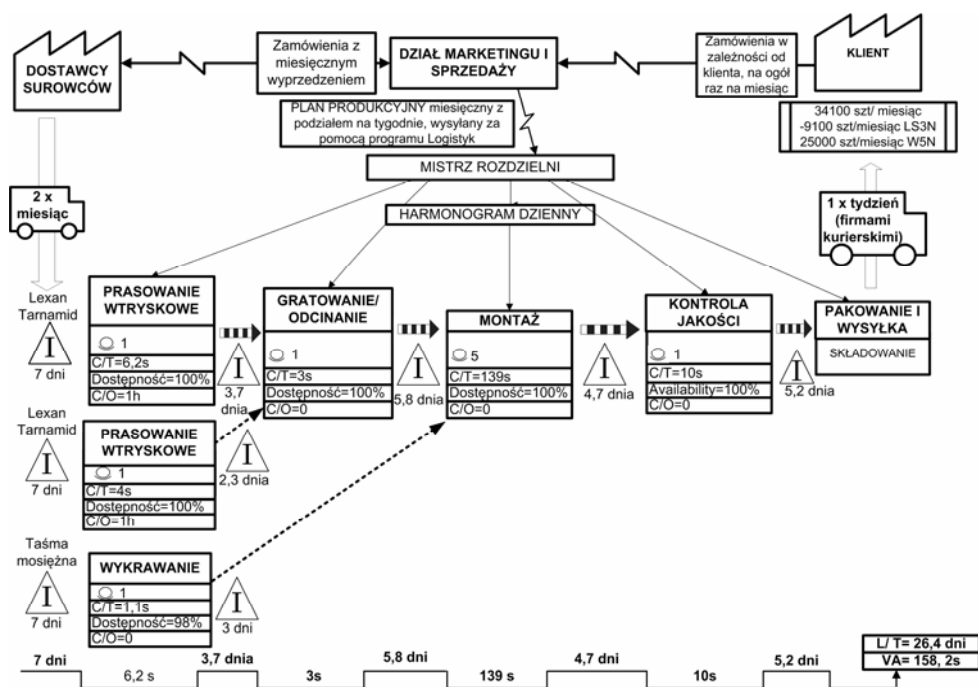
Za przykład do zbudowania mapy VSM stanu obecnego posłużył proces produkcyjny lampki sygnalizacyjnej montowanej w sprzęcie AGD. Lampki są produkowane w trzech kolorach, a ich dzienna produkcja wynosi 1705 sztuk. Celem budowy mapy VSM stanu obecnego (rys. 29) była wizualizacja funkcjonowanie obecnego systemu i identyfikacja występujących w nim problemów. Na mapie zaznaczono sposób sterowania procesem, przepływ materiałów, operacje technologiczne wraz z ich podstawowymi parametrami, operacje transportu, miejsca występowania zapasów oraz ich wielkość. U dołu mapy zaznaczono czas przetwarzania, który wynosi 158,2 sekundy oraz czas przejścia materiału, wynoszący 26,4 dni. Czas ten jest długi w stosunku do czasu przetwarzania, co spowodowane jest dużą ilością zapasów produkcji w toku. Mapę stanu obecnego omawianego procesu przedstawiono na rysunku 29.

Analiza mapy identyfikuje wiele problemów, które są na niej widoczne dzięki schematycznemu zapisowi. Sposób ich rozwiązania zostanie naniesiony na mapie stanu przyszłego (rys. 30). Za najważniejsze problemy uznano [34]:

- Sterowanie produkcją, które odbywa się przez harmonogram produkcji. Po-szczególne stanowiska pracują, nie uwzględniając zapotrzebowania stanowiska

następnego. Powoduje to gromadzenie się zapasów produkcji w toku oraz problemy z terminowością realizacji zleceń.

- Marnotrawstwo związane z nadprodukcją. Wielkość zapasów produkcji w toku sięga nawet tygodniowej produkcji. Spowodowane jest to znacznym zróżnicowaniem asortymentu drobnych elementów, które są produkowane na zapas, bo stanowią podzespół dla innych wyrobów gotowych.



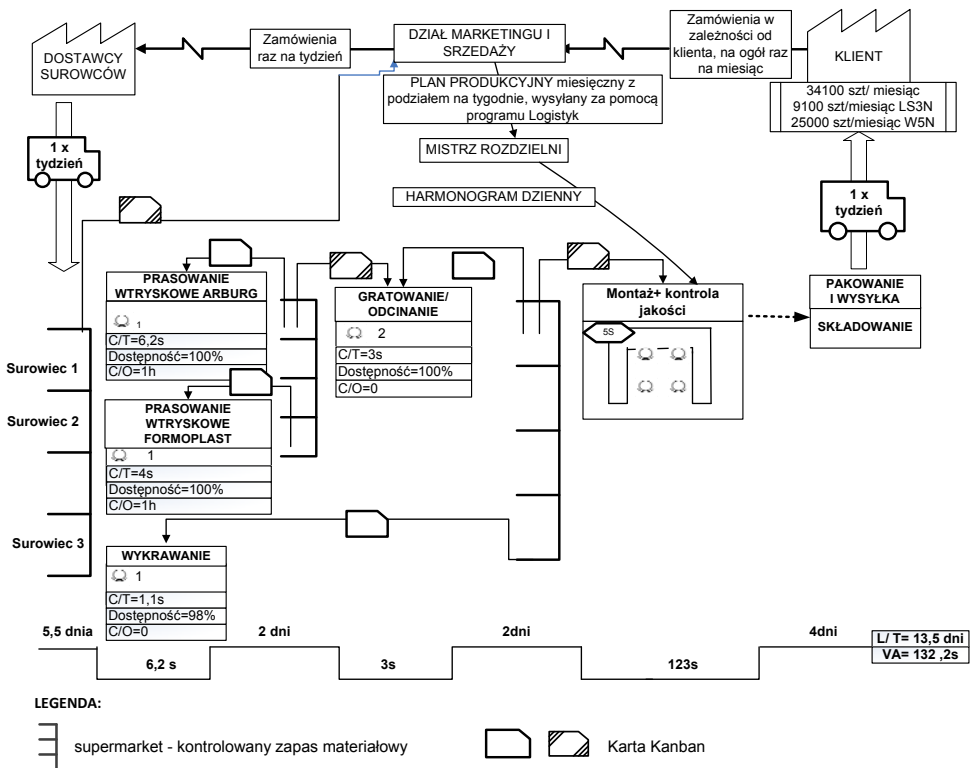
LEGENDA:

- proces wytórczy jedna ikona oznacza obszar ciągłego przepływu; wykorzystywany również do oznaczenia obszaru kontroli
- źródło zewnętrzne wykorzystywana do określenia klientów, dostawców oraz zewnętrznych procesów wytórczych
- tabela danych wykorzystywana do charakterystyki procesu wytórczego, obszaru, klienta itp.
- zapasy / magazyny wykorzystywana do oznaczenia zapasów z określeniem ich liczności oraz czasu rotacji zapasów
- transport samochodowy oznaczenie częstotliwości dostaw oraz wysyłek
- przemieszczanie materiału (pchanie) zazwyczaj przepływ odbywa się na podstawie harmonogramu
- przemieszczanie wyrobów gotowych do klienta
- cofanie/ciągnięcie materiału zazwyczaj z supermarketu

Rys. 29. Mapa VSM stanu obecnego procesu produkcyjnego lampki sygnalizacyjnej [34]

- Produkcję opartą na montażu ręcznym, który jest najdłuższą i najbardziej pracochłonną operacją. Złożoność technologiczna wyrobów jest mała, dlatego koszty, które firma poniosłaby w celu modernizacji stanowisk montażowych, byłyby niewielkie.
- Liczne przestoje maszyn spowodowane głównie oczekiwaniem na dostawy komponentów.

Do rozwiązania przedstawionych problemów postanowiono zastosować wybrane narzędzia Lean Production takie jak mapowanie strumienia wartości 5S oraz przepływ ciągły. Wprowadzono trzy supermarkety, co pozwoliło ustalić stałe ilości surowców, po zwiększeniu częstotliwości dostaw. Za regulator procesu wybrano operacje montażu, gdyż żadne działania następujące po montażu nie mają charakteru ciągłego. Zaproponowane zmiany zostały umieszczone na mapie stanu przyszłego (rys. 30), która stanowi schematyczny obraz sposobu funkcjonowania zreorganizowanego systemu produkcyjnego. Takie rozwiązanie ułatwia analizę proponowanych zmian i ocenę zasadności ich wprowadzenia. Po zaakceptowaniu zmiany te zostaną wprowadzone do systemu rzeczywistego.



Rys. 30. Mapa VSM stanu przyszłego procesu produkcyjnego lampki sygnalizacyjnej [34]

Opracowane rozwiązanie umożliwiło znaczne zmniejszenie czasu przejścia w systemie produkcyjnym z 26,4 dni do 13,5 dnia. Dodatkowo znacznie obniżono poziomy zapasów w toku.

3.1.3. MODELE PROCESÓW ZAPISANE W NOTACJACH PROCESÓW BIZNESOWYCH

Kolejną grupą modeli schematycznych stanowią modele procesów zapisane w notacjach biznesowych, umożliwiające „identyfikowanie, definiowanie, strukturalizowanie, projektowanie, integrowanie procesów, a w dalszej kolejności usprawnianie procesów i zarządzanie nimi. Wynikiem modelowania są modele procesów, będące uproszczonym, niematerialnym odzwierciedleniem realnych procesów” [154]. Modele procesów biznesowych wykorzystuje się do [154, 115]:

- identyfikacji procesów,
- sterowania nimi przez ustalenie celów, ich kontroli w czasie oraz, w zależności od wartości uzyskanych parametrów, podjęcie działań korygujących,
- tego samego sposobu rozumienia procesów przez osoby z różnych szczebli organizacyjnych i z różnych obszarów funkcjonalnych w organizacji,
- do przeprowadzania zmian organizacyjnych, zmian dostosowawczych do zmieniających warunków otoczenia, w restrukturyzacji i reorganizacji przedsiębiorstwa,
- projektowania i wdrażania systemu zarządzania jakością, na potrzeby dokumentowania i certyfikowania systemu,
- wdrażania rachunku procesowego kosztów (ang. *Activity Based Costing*),
- wdrażania podejścia procesowego oraz kształtowania zarządzania wiedzą w organizacji zorientowanego na procesy,
- do kształtowania i wdrażania systemów informatycznych w przedsiębiorstwach.

Do budowy tego typu modeli zazwyczaj wykorzystuje się tzw. metodyki modelowania. Metodyka zawiera zestaw pojęć, notacji, określa rodzaje modeli, język zapisu, techniki i sposoby postępowania służące do analizy systemu oraz do projektowania pojęciowego, strukturalnego i logicznego modelu. Zazwyczaj w metodyce zawarty jest:

- sposób modelowania systemu z podziałem na etapy prowadzonego projektu oraz role uczestników i scenariusze postępowania w każdym z etapów,
- rodzaje modeli tworzone w każdym etapie projektu i notacje, których należy używać podczas budowy modeli,
- rodzaj dokumentacji powstający na każdym etapie projektu.

Istnieje wiele różnych metodyk umożliwiających schematyczne modelowanie procesów biznesowych. Ich zróżnicowanie oraz historia rozwoju bierze się stąd, że przed modelowaniem procesów biznesowych zazwyczaj stawia się dwie grupy celów [154]. Jedna grupa celów związana jest z projektowaniem i zarządzaniem organizacją, a druga z kształtowaniem systemów informatycznych do zarządzania organizacją. Zamode-

lowanie procesów biznesowych stanowi podstawę w wyborze odpowiedniego systemu informatycznego oraz znacznie redukuje ryzyko jego budowy.

W zależności od przyjętej grupy celów rozróżnia się metodyki modelowania procesów biznesowych do prowadzenia analiz, optymalizacji i sterowania procesami gospodarczymi oraz metodyki do modelowania procesów w celu budowy systemów informatycznych. Dalej przedstawiono wybrane notacje wykorzystywane między innymi w modelowaniu systemów produkcyjnych.

3.1.3.1. NOTACJA IDEF0

Metody IDEF (ang. *Integration Definition*) są to metody modelowania i projektowania, stosowane w komputerowo wspomaganym inżynierii biznesu, do opisu i analizy stanu organizacji oraz planowania i zarządzania transformacją w różnych aspektach [112]. Rodzina metod IDEF obejmuje metody modelowania przedsiębiorstw w aspekcie [192]:

- ich funkcji,
- odbywającego się przetwarzania informacji,
- zachodzących w nich procesów.

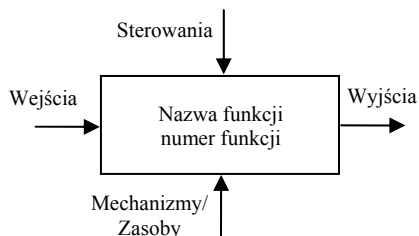
IDEF0 (ang. *Integration Definition for Function Modelling*) należy do grupy metod IDEF i służy do budowania modelu funkcji, będącego ustrukturyzowaną reprezentacją graficzną funkcji, działań, czynności zachodzących w przedsiębiorstwie lub w innym systemie. Metoda IDEF0 jest reprezentacją graficzną funkcji, działań i czynności, które zachodzą w określonym systemie (np. w przedsiębiorstwie). Zasada tworzenia modeli z użyciem metody IDEF0 opiera się na tworzeniu bloków (ang. *box*), które składają się z następujących elementów [84]:

- Funkcja – czynność (działanie), proces lub przekształcanie określane przez czasownik lub zwrot czasownikowy, który opisuje to, co musi być dokonane, aby uzyskać określony cel. Przykładem funkcji może być wytwarzanie produktów.
- Wejścia – dane lub obiekty, które są przekształcane przez funkcję na wyjścia.
- Wyjścia – dane lub obiekty, które są tworzone przez funkcję.
- Sterowanie – warunki potrzebne do tworzenia poprawnych wyjść. Dane i obiekty modelowane jako czynniki sterujące mogą być przekształcane zgodnie z funkcją, tworząc wyjścia. Sterowanie to wszystkie czynniki, które wymuszają działanie systemu.
- Mechanizm – środki do wykonywania funkcji. Mechanizmy umożliwiają działanie systemu.

Opisane bloki składają się na tzw. kostkę ICOM (ang. *Inputs, Control, Outputs, Mechanism*), co schematycznie przedstawiono na rysunku 31.

Poszczególne kostki ICOM można łączyć i wykorzystywać do modelowania procesów gospodarczych. Możliwość zamieszczenia na schemacie sposobu sterowania, jak i zasobów realizujących dany proces lub czynność, powoduje, że narzędzie to dobrze nadaje się do modelowania systemów produkcyjnych. Modele IDEF0 służą przede wszystkim do usystematyzowania wiedzy o funkcjach systemu i do ułatwienia porozumiewania się pod-

czas prac nad jego rozwojem. Mogą służyć także do wyszukiwania i eliminacji czynności zbędnych w funkcjonowaniu systemu, a także całych zbędnych cykli działań [192].

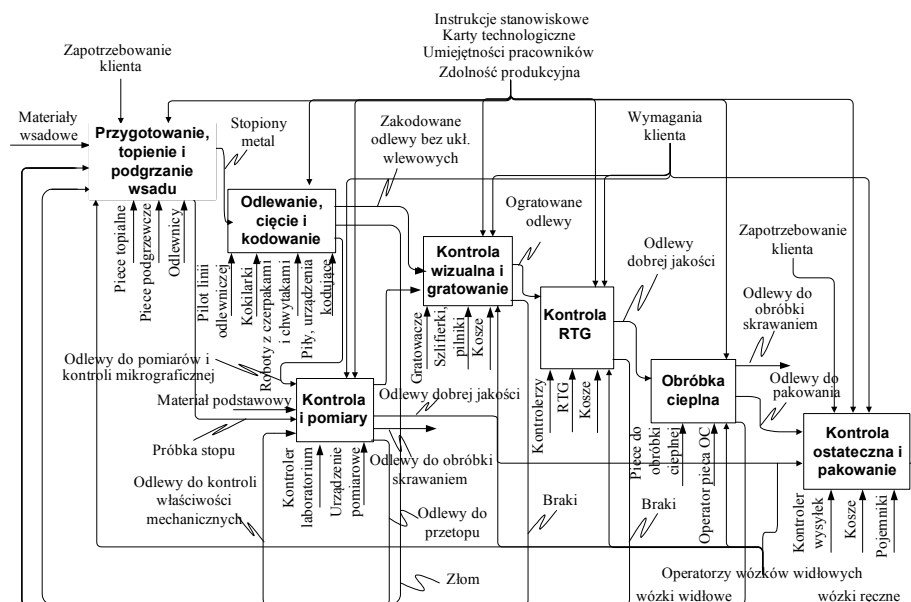


Rys. 31. Schemat bloku kostki ICOM

Przykład 3

Model procesu produkcji odlewów korpusu zacisku hamulcowego z opisany w notacji IDEF0

Na rysunku 32 przedstawiono model schematyczny procesu produkcji odlewów korpusu zacisku hamulcowego. Do budowy modelu wykorzystano notację IDEF0. Na modelu zaznaczono główne operacje procesu produkcyjnego, elementy wejścia i wyjścia z operacji, zasoby, które są potrzebne do wykonania operacji i elementy sterujące.



Rys. 32. Schemat procesu produkcyjnego odlewów korpusu zacisku hamulcowego zapisany w notacji IDEF0 [34]

Tego typu model pomaga zrozumieć działanie systemu produkcyjnego, pokazuje zależności i powiązania występujące między poszczególnymi obiektami oraz ukazuje czynniki wpływające na operacje występujące w procesie. Całość modelu systemu można dekomponować i prowadzić analizy na niższych poziomach szczegółowości. Zależności między modelami podrzędnymi i nadrzędnymi przedstawia się graficznie za pomocą drzewa hierarchii funkcji.

3.1.3.2. NOTACJA BPMN

Obecnie najpopularniejszą notacją modelowania systemów produkcyjnych jest notacja BPMN (ang. *Business Process Modelling Notation*), będąca kompromisem pomiędzy zrozumiałością modeli biznesowych i wymogami modeli implementacyjnych systemów informatycznych. Jej popularność przejawia się między innymi liczbą narzędzi informatycznych wykorzystujących tę metodę [167]. Graficzna notacja BPMN powstała z inicjatywy organizacji BPMI (ang. *Business Process Modelling Initiative*) wyłonionej z OMG (ang. *Object Management Group*). Oferuje ona jeden diagram BPD (ang. *Business Process Diagram*), który ma uwidaczniać logikę biznesową procesu i umożliwiać modelowanie procesów biznesowych o różnym poziomie złożoności.

Według grupy OMG istnieje ponad 60 implementacji różnego rodzaju narzędzi wspierających notację BPMN, z czego część zapewnia dodatkowe możliwości, tj. przeprowadzenia symulacji, analizy czy optymalizacji procesu [220]. Pomimo nieco większej komplikacji budowanych modeli w porównaniu z IDEF0, notacja BPMN jest lepszym narzędziem do modelowania systemów, ponieważ ma bogaty zestaw obiektów i elementów oraz umożliwia automatyczne generowanie kodu programu. Notacja BPMN definiuje BPD (ang. *Business Process Diagram*) oraz elementy notacji występujące na nim. Elementy te można pogrupować w następujące kategorie [156]:

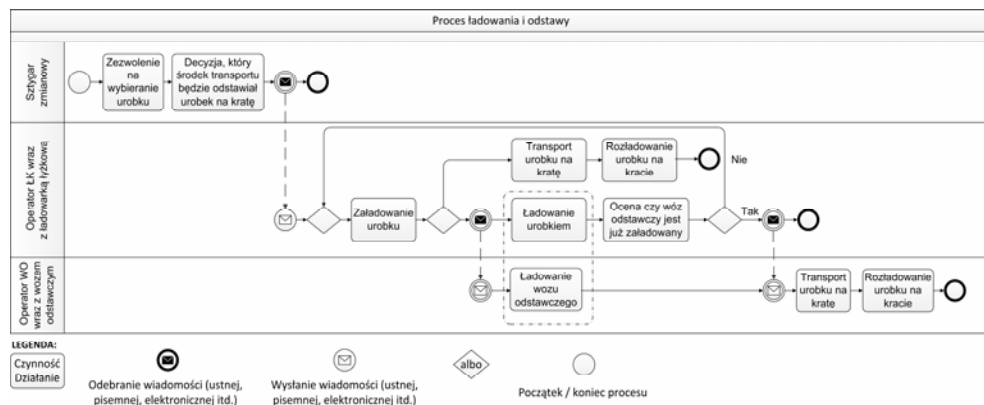
- obiekty przepływu – podstawowe elementy aktywne, które definiują zachowanie procesu (zdarzenia, aktywności, bramki),
- obiekty łączące – połączenia na diagramie pomiędzy elementami, takie jak: przepływy sterowania reprezentujące przebieg procesu, przepływ komunikatów reprezentujący przesyłanie komunikatu oraz powiązania pokazujące powiązanie między artefaktem a obiektem przepływu,
- obiekty miejsc realizacji procesu – elementy umożliwiające grupowanie elementów względem miejsc, w których realizowany jest proces,
- artefakty – dodatkowe elementy na diagramie, służące zobrazowaniu informacji uzupełniających.

Notacja BPMN posługuje się tylko jednym rodzajem diagramu, a dzięki elementom aktywnym umożliwia opis skomplikowanych procesów biznesowych. Sformalizowanie notacji ułatwia automatyczne wygenerowanie kodu BPEL4WS (ang. *Business Process Execution Language for Web Services*) służącego do automatycznego tworzenia aplikacji.

Przykład 4

Model procesu ładowania i odstawy rudy miedzi zapisany w notacji BPMN

Model schematyczny procesu ładowania i odstawy rudy miedzi w kopalni zapisany w notacji BPMN przedstawiono na rysunku 33. Celem procesu ładowania i odstawy jest przewiezienie rudy miedzi z tzw. przodków (miejsc, w których znajduje się rozkruszona ruda miedzi) na punkty przesypowe (tzw. kraty), które są bezpośrednio połączone z przenośnikami taśmowymi. Całość procesu realizowana jest za pomocą wozów odstawczych, które ładowane są ładowarko-koparkami (tzw. ŁK).



Rys. 33. Schemat procesu ładowania i odstawy w kopalni miedzi zapisany w notacji BPMN [27]

Tak jak w przypadku modelu zapisanego w notacji IDEF0, celem budowy modelu w notacji BPMN jest identyfikacja czynności wykonywanych w trakcie przebiegu procesu oraz przedstawienie zależności i powiązań pomiędzy nimi. Po lewej stronie modelu zaznacza się zasoby wykonujące dane czynności. Elementami sterującymi są informacje, a w modelu rozróżnia się informacje wysłane i odebrane. Po lewej stronie zaznaczone są zasoby realizujące poszczególne czynności w procesie. Również tutaj poszczególne procesy i operacje można dekomponować na niższe poziomy.

Niektóre programy do modelowania procesów biznesowych, np. Corel iGrafx Process, umożliwiają zaawansowaną symulację przebiegu procesu, analizę procesu i wykrycie błędów [129]. Symulacja taka daje możliwość manualnej optymalizacji procesu, np. ze względu na czas obsługi, czy koszty.

Rozwój metod i technik do modelowania procesów oraz narzędzi informatycznych ułatwiających ich stosowanie doprowadził m.in. do powstania procesowo zorientowanego zarządzania przedsiębiorstwem [62], w którym sposób organizacji i struktura organizacyjna podporządkowana jest realizacji kluczowych procesów gospodarczych. Sposób zarządzania tego typu organizacjami w znacznej mierze sprowadza się do sterowania kluczowymi parametrami procesów w przedsiębiorstwie. Również tutaj na pomoc przychodzą

systemy informatyczne, a w szczególności systemy przepływu prac (ang. *Workflow*), w których sterowanie procesem można w znacznym stopniu zautomatyzować [62].

3.2. MODELE SYMULACYJNE SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Modele schematyczne, scharakteryzowane w podrozdziale 3.1, umożliwiają odwzorowanie systemu produkcyjnego, przedstawienie jego struktury, elementów i związków pomiędzy nimi oraz zrozumienie sposobu funkcjonowania. Jednak jedną z podstawowych trudności w modelowaniu złożonych systemów produkcyjnych jest uwzględnienie w modelowanej rzeczywistości działań decyzyjnych oraz skutków podjętych decyzji [170, 196]. Dlatego do określania skutków podejmowanych decyzji zazwyczaj występuje się komputerowe modele symulacyjne systemów produkcyjnych.

Metody modelowania i symulacji komputerowej stosuje się wtedy, gdy uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi jest zbyt skomplikowane, a bezpośrednie eksperymentowanie na systemie rzeczywistym jest zbyt pracochłonne lub niemożliwe do przeprowadzenia. Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania umożliwia ich analizę oraz prześledzenie sposobu funkcjonowania, trwającego niekiedy wiele lat, w ciągu zaledwie kilku minut. Ułatwia przeprowadzenie weryfikacji przyjętych założeń przed ich zastosowaniem, a także określenie nieprawidłowości, jakie mogą wystąpić w czasie eksploatacji, w tym szczególnie słabe punkty projektowanego lub realizowanego systemu produkcyjnego [68].

3.2.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA MODELI SYMULACYJNYCH

Modele symulacyjne należą do grupy modeli symbolicznych opartych na zapisie matematycznym, w których odwzorowanie rzeczywistości odbywa się za pomocą symboli i relacji matematycznych [97]. Matematyczny zapis struktury i zachowania systemu daje możliwość doświadczalnego sprawdzenia poprawności odwzorowania oraz prowadzenia prac badawczych na tak skonstruowanym modelu. Dlatego też modelowanie matematyczne obejmuje dwa etapy: budowanie modelu oraz eksperymentowanie na nim.

Klasyczne matematyczne modelowanie systemów produkcyjnych napotyka poważne trudności. Parametry procesów zmieniają się dynamicznie i zależą od wielu zmiennych czynników pochodzących z otoczenia. Dodatkowo współczesne systemy produkcyjne są bardzo złożone i skomplikowane. Wszystko to powoduje, że modele matematyczne wymagają wykorzystania skomplikowanego aparatu matematycznego, co z kolei przekłada się na czas ich budowy [206].

Matematycznie system (S) można zdefiniować jako byt (B) składający się ze zbioru elementów (E), charakteryzujących się określonymi właściwościami, atrybutami (A), połączonych wzajemnymi relacjami (Re), stanowiących celowo zorientowaną jedną całość, gdzie [47]:

$$S = B(E, A, R), \quad E = [E_1, \dots, E_n], \quad A = [A_1, \dots, A_m], \quad Re = [Re_1, \dots, Re_r] \quad (5)$$

Można zatem powiedzieć, że system może składać się z $n > 1$ elementów (E), które mogą mieć m atrybutów (A), uczestniczących w $r \geq n - 1$ relacjach (Re).

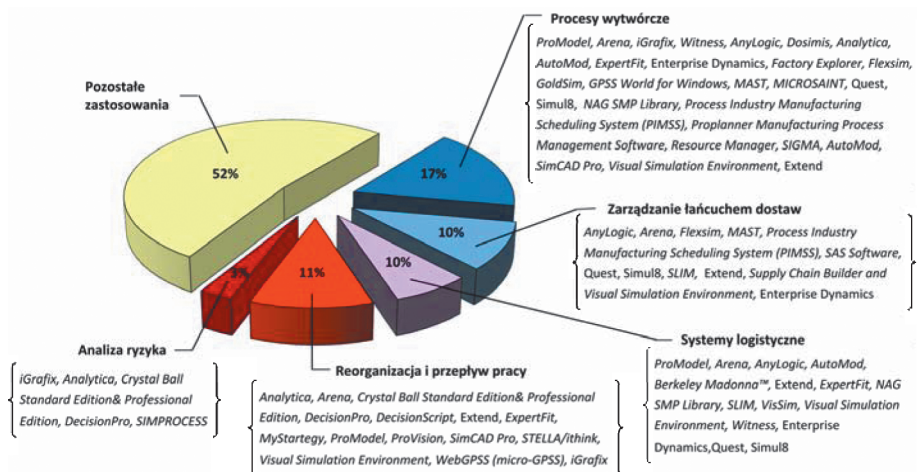
Systemy produkcyjne są systemami ciągłymi dynamicznymi, ponieważ ich wielkości sterujące mogą zmieniać się w każdej chwili, a wielkości sterowane mogą być mierzone w każdej chwili. Systemy dynamiczne ciągłe można opisać za pomocą trzech rodzajów modeli matematycznych [24]:

- wektora stanu,
- opisu zależności wejście–wyjście za pomocą równania różniczkowego,
- opisu zależności wejście–wyjście w formie operatorowej.

Chcąc wykorzystać model systemu produkcyjnego do podejmowania decyzji powinien on uwzględniać wszystkie elementy i parametry istotne z perspektywy problemu decyzyjnego. Większość obserwowanych w systemach produkcyjnym zjawisk dynamicznych jest skutkiem wielu zdarzeń cząstkowych, które zachodzą w różnych obszarach funkcjonalnych, na różnych poziomach organizacyjnych, często w różnym czasie. Zjawiska w jednym obszarze systemu wpływają na inne funkcjonalne systemu produkcyjnego. W przypadku takich złożonych i zintegrowanych systemów produkcyjnych wzory matematyczne ulegają znacznej rozbudowie, a czas ich budowy znacznie wzrasta.

Pomocne w tej sytuacji jest budowanie komputerowych modeli systemów produkcyjnych, w których model matematyczny zapisany jest w pamięci komputera za pomocą języka programowania lub w specjalnym programie (pakiecie) komputerowym [85, 177, 214]. Na rynku dostępnych jest wiele pakietów do modelowania i symulacji systemów produkcyjnych. Programy te oparte są na symbolicznym języku zapisu i ułatwiają budować model z gotowych, predefiniowanych obiektów jak z klocków. Użytkownik definiuje jedynie relacje pomiędzy obiektami, parametry początkowe oraz logikę przebiegu procesów.

Ze względu na to, że systemy produkcyjne są bardzo złożone i różne w poszczególnych branżach przemysłu oraz mają różne zastosowania symulacji komputerowej systemów produkcyjnych, nie ma jednego uniwersalnego oprogramowania, które można uznać za najlepsze na rynku. Wybór pakietu każdorazowo powinien zależeć od celu modelowania oraz od rodzaju systemu poddawanego analizie. Na rysunku 34 przedstawiono procentowy udział zastosowania modelowania i symulacji komputerowej w wybranych obszarach zarządzania systemami produkcyjnymi. Do każdego obszaru przypisano najczęściej wykorzystywane komercyjne narzędzia komputerowe.



Rys. 34. Zastosowanie modelowania i symulacji komputerowej w wybranych obszarach zarządzania systemem produkcyjnym oraz najczęściej stosowane w tych obszarach narzędzia komercyjne [1, 59, 195]

Symulacja komputerowa systemu lub procesu produkcyjnego polega na zbudowaniu komputerowego modelu badanego systemu lub procesu, a następnie, przez tzw. eksperymenty symulacyjne, na badaniu wpływu parametrów (sygnałów) wejściowych na zachowanie modelu. Zwykle przeprowadza się wiele eksperymentów symulacyjnych na modelu dla różnych zestawów wartości parametrów wejściowych. Wyniki otrzymywane są w tzw. raportach z symulacji. Analiza raportów ułatwia wybór najlepszego (optymalnego) z perspektywy celu budowy modelu zestawu parametrów wejściowych. Dodatkowo badany model można udoskonalić i przeprowadzić kolejne symulacje dla różnych jego wariantów. Posiadanie modeli symulacyjnych systemu produkcyjnego znacznie skraca czas podejmowania decyzji co do jego rozwoju. Kolejną zaletą jest możliwość wyboru decyzji najlepszej, która będzie obciążona najmniejszym ryzykiem ze względu na możliwość przewidzenia przyszłych stanów analizowanego systemu, co z kolei przekłada się na zapewnienie stabilności reorganizowanego systemu. Związek między modelowaniem, symulacją i optymalizacją w kontekście analiz systemu produkcyjnego przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Relacje pomiędzy modelowaniem, symulacją i optymalizacją [94]

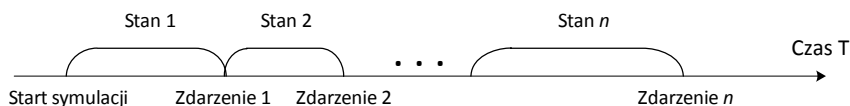
	Wejścia	System	Wyjścia
Modelowanie	znane	???	znane
Symulacja	znane	znane	???
Optymalizacja	???	znane	znane

Rodzaj symulacji zależy od sposobu jej działania. Wyróżnia się symulację statyczną, stochastyczną i deterministyczną. Symulacja statyczna, nazywana również symulacją Monte Carlo, nie uwzględnia przebiegu zjawisk w czasie. Dane do symulacji pochodzą często z badań statystycznych [31].

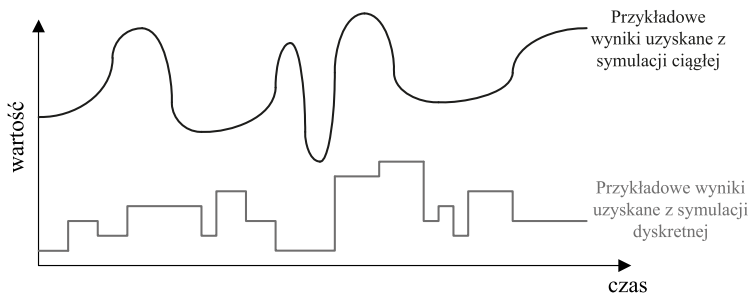
Symulacja stochastyczna opiera się na procesach stochastycznych, to znaczy takich, które zbudowane są z sekwencji losowej z generowanych wartości. Symulacja stochastyczna odnosi się do symulacji, w której jedna lub więcej zmiennych wejściowych są przypadkowe. Symulacja stochastyczna generuje wynik, który sam w sobie jest przypadkowy, dlatego, aby dokonać właściwej oceny wyników, trzeba przeprowadzić kilka losowych prób, gdyż każda różni się od siebie statystycznie [99].

Symulacja deterministyczna nie wykorzystuje losowych zdarzeń. 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 [99].

Inny podział symulacji uwzględnia sposób przeprowadzania eksperymentów w czasie. Wówczas wyróżnia się symulację dyskretną i ciągłą. W dyskretnych zmiany w modelu pojawiają się w określonych punktach czasu, w momencie wystąpienia pewnych zdarzeń [5, 99]. Przykład zmian zachodzących w modelu podczas eksperymentu za pomocą symulacji dyskretniej przedstawiono na rysunku 35.



Rys. 35. Zmiany zachodzące w modelu podczas symulacji dyskretniej [99]



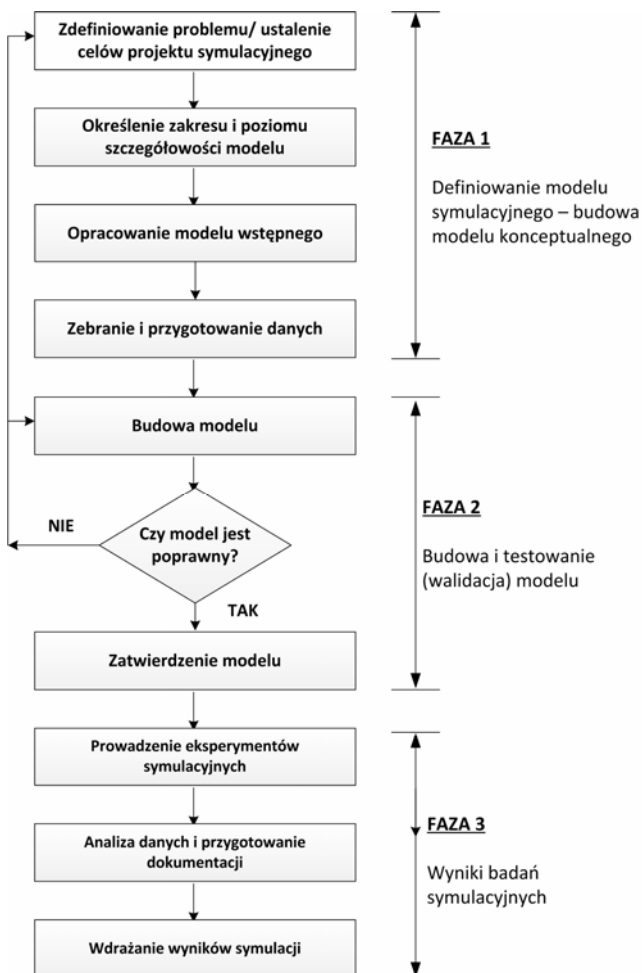
Rys. 36. Porównanie wyników uzyskanych z symulacji ciągłej i dyskretniej [99]

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. W praktyce trudno jest znaleźć system, którego zdarzenia byłyby całkowicie ciągłe, czy całkowicie dyskretnie, zazwyczaj jednak można stwierdzić, która z charakterystyk (ciągła czy dyskretna) dominuje w badanym systemie [5]. Przykład wyników uzyskanych za pomocą symulacji ciągłej i dyskretniej przedstawiono na rysunku 36.

Większość procesów produkcyjnych ma charakter dyskretny [214]. Z tego powodu większość informatycznych pakietów do symulacji umożliwia modelowanie systemów dyskretnych.

3.2.2. SPOSÓB BUDOWY MODELI SYMULACYJNYCH

Nie ma jednego uniwersalnego sposobu budowy modeli symulacyjnych. Modele można budować z użyciem różnych technik i metod, przy czym każda z nich może spełniać cel projektu symulacyjnego [34, 37, 201]. Zazwyczaj modelowanie i symulacja przebiega w trzech następujących po sobie fazach, co przedstawiono na rysunku 37.

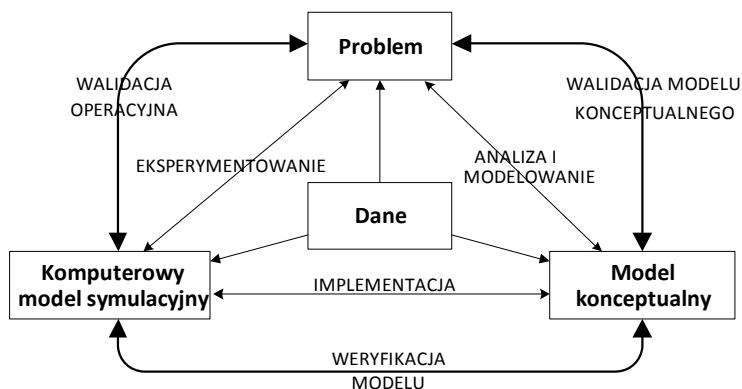


Rys. 37. Etapy budowy modelu symulacyjnego i prowadzenia projektu z jego wykorzystaniem [37, 192]

W fazie 1 następuje definiowanie modelu symulacyjnego przez budowę tzw. modelu konceptualnego. Model konceptualny jest opisem celów symulacji, danych wejściowych i wyjściowych, założeń i przyjętych uproszczeń budowanego modelu symulacyjnego, ale także wybranych do modelowania elementów systemu oraz ich wzajemnych relacji [174]. Dobrze udokumentowany oraz przejrzysty model konceptualny wpływa na obniżenie kosztów budowy modelu symulacyjnego oraz umożliwia redukcję późniejszych poprawek [147, 174]. Do budowy modeli konceptualnych bardzo często wykorzystuje się modele schematyczne, opisane w podrozdziale 3.1 niniejszej pracy.

Najistotniejszymi etapami, oprócz budowy modelu w wybranym informatycznym pakiecie symulacyjnym, w fazie 2 jest jego walidacja oraz zatwierdzenie. Walidacja polega na sprawdzeniu czy model odzwierciedla rzeczywisty system produkcyjny, czy wyniki z modelu są zbliżone z wynikami rzeczywistymi i czy model może być użyty do podejmowania z pełnym zaufaniem decyzji dotyczących systemu rzeczywistego. Zatwierdzenia modelu dokonują zazwyczaj osoby z przedsiębiorstwa, w którym prowadzony jest projekt, należący do średniego lub wyższego szczebla zarządzania.

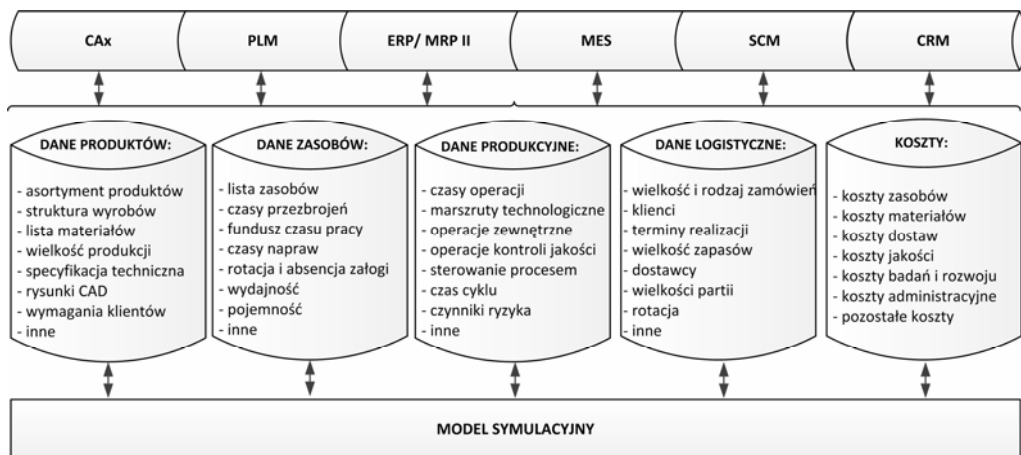
Zasadniczym celem fazy 3 jest prowadzenie eksperymentów symulacyjnych i opracowanie różnych rozwiązań, w zależności od zmiennych parametrów modelu. Na etapie analizy i interpretacji wyników następuje analizowanie krok po kroku wyników eksperymentów oraz wybór optymalnego rozwiązania ze względu na kryteria optymalizacyjne przyjęte w fazie 1 [37]. Inny przebieg etapów w modelowaniu i symulacji przedstawiono na rysunku 38.



Rys. 38. Etapy w projektach symulacyjnych [215]

W projektach symulacyjnych często powraca się do wcześniejszych etapów wraz ze zdobyciem nowych informacji na temat systemu. Często po zweryfikowaniu i zbadaniu poprawności modelu zachodzi konieczność jego poprawy, dlatego należy modyfikować dane wejściowe oraz zależności logiczne, jakie przyjęto początkowo w modelu [34].

Do najbardziej czasochłonnego etapu w projektach symulacyjnych należy etap zbierania i przygotowywania danych, które następnie będą wykorzystane w budowie modelu komputerowego [55, 88]. Dlatego coraz częściej dąży się do zasilania modeli symulacyjnych danymi pochodzącymi z systemów informatycznych przedsiębiorstwa. Dane te mogą być obarczone błędami lub mogą być niepełne. Wymianę danych pomiędzy najpopularniejszymi systemami informatycznymi a modelem symulacyjnym przedstawiono na rysunku 39.



Rys. 39. Wymiana danych między modelem symulacyjnym a systemami informatycznymi

Źródłami danych często są również informacje historyczne oraz osoby mające wiedzę na temat systemu produkcyjnego. W przypadku rejestracji bezpośredniej dane zbierane są w miejscu ich powstawania, np. na stanowiskach pracy. W praktyce zbieranie danych trwa od początku do końca trwania projektu symulacyjnego. Dzieje się tak dlatego, że jedne informacje mogą być dostępne w momencie wystąpienia zapotrzebowania na nie, a inne wymagają czasu, aby je odpowiednio przygotować i opracować [55]. Wyróżnia się 4 typy zbierania danych do modeli symulacyjnych [72, 88, 113, 173, 191, 192]:

1. Manualne zbieranie danych z systemu rzeczywistego przez wypełnianie kart pomiarowych, obserwację oraz pozyskiwanie informacji od pracowników. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość bieżącego sprawdzenia i zweryfikowania danych. Wadą natomiast jest pracochłonność i czasochłonność związana z ręcznym zbieraniem danych i ich wprowadzaniem do modelu symulacyjnego.

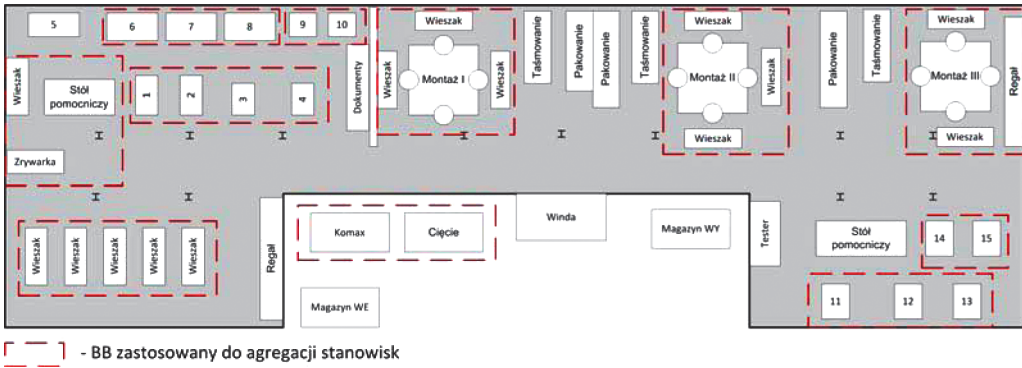
2. Eksport danych z systemów informatycznych do arkusza kalkulacyjnego Excel, a następnie ich importu do modelu symulacyjnego. Zaletą tej metody jest możliwość ręcznego uzupełnienia danych lub ich weryfikacji przed „zacytaniem” do modelu.

3. Budowanie tzw. sprzęgów informatycznych między systemem informatycznym a modelem symulacyjnym. Dzięki odpowiednio opracowanemu sprzęgowi jest możliwość bezpośredniego eksportu danych z systemu informatycznego i bezpośredniego ich importu do modelu symulacyjnego. Metoda ta wymaga najmniejszego nakładu pracy związanego z pozyskaniem danych oraz ułatwia częste uaktualnianie modeli.

4. Metoda umożliwiająca bezpośredni eksport/import danych między modelem symulacyjnym a systemem informatycznym. Wymaga to budowy modelu symulacyjnego, gdzie moduły pobierania danych są bezpośrednio związane z systemami eksportu danych systemów informatycznych. Takie rozwiązanie w znaczący sposób poprawia odporność systemu na błędy, poprawia elastyczność modeli symulacyjnych oraz w znaczący sposób redukuje czas potrzebny na wprowadzanie danych do modelu. Jednakże główną wadą tego rozwiązania jest to, że dane mogą zostać duplikowane, ponieważ zabezpieczeniem działania takich modeli jest to, że każdy moduł wprowadzania danych do modelu symulacyjnego ma kilka źródeł danych.

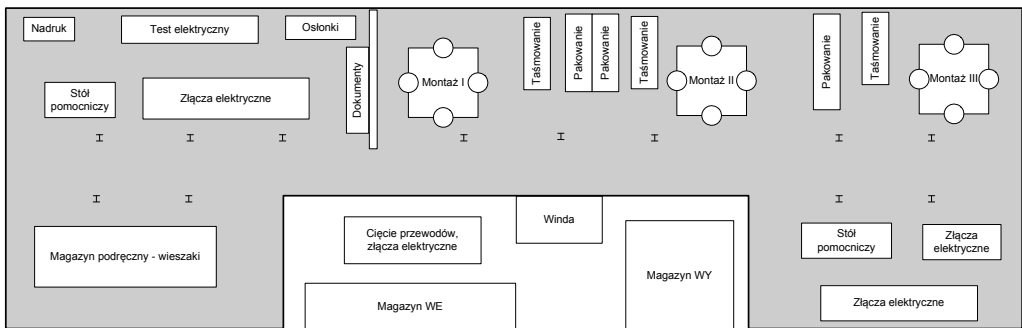
Aby zmniejszyć czasochłonność budowy modelu, związaną z dużym stopniem szczegółowości modelowanych elementów, często stosuje się agregację elementów w jeden obiekt, tzw. Black Box (BB), który następnie będzie uwzględniony w modelu [55, 60]. Agregowanie stanowisk pracy w BB umożliwia budowanie przedstawicieli modelowanych elementów i ich grup. Następnie, za pomocą odpowiednich współczynników przeliczeniowych, można przenosić otrzymane w wyniku symulacji charakterystyki i dane na pozostałe modelowane obiekty. Takie podejście upraszcza budowę modelu, szczególnie w przypadku organizacji produkcji typu gniazdowego. Ułatwia to skrócenie czasu budowy modelu przez wewnętrzne, zastępcze zamodelowanie szczegółów procesu wytwórczego niemających istotnego wpływu na badany system [124]. Osoba budująca model musi podjąć decyzję, czy symulacja przeprowadzona za pomocą modelu uproszczonego w ten sposób da wiarygodne i satysfakcjonujące wyniki.

Zależnie od stopnia szczegółowości modelu Black Box, może być cała linia produkcyjna, gniazdo lub stanowisko wytwórcze. Stanowiska produkcyjne agreguje się dla poszczególnych gniazd, jeżeli zachodzące w nich kolejne operacje technologiczne nie są przedzielone zróżnicowanymi czynnościami transportowymi wykorzystującymi drogi transportowe, lub nie korzystają z buforów stanowiskowych. Łączenie kilku pozycji w jedną odbywa się w różny sposób, zależnie od tego czy położone są one równolegle czy szeregowo oraz od stopnia złożoności budowanego modelu symulacyjnego. Przykład idei agregacji stanowisk pracy analizowanego layoutu przykładowej hali produkcyjnej w BB przedstawiono na rysunku 40.



Rys. 40. Przeznaczony do zamodelowania layout hali produkcyjnej przed agregacją w BB [55]

Na rysunku 41 przedstawiono ten sam layout hali produkcyjnej, dla której budowany zostanie model symulacyjny po agregacji w BB.



Rys. 41. Layout z rysunku 40 po agregacji w BB [55]

Jeżeli dla stanowisk zgrupowanych w BB każda następną operacją technologiczną rozpoczyna się dopiero po wykonaniu poprzedniej operacji dla wszystkich elementów wchodzących w skład serii produkcyjnej, to jest to szeregowy przebieg produkcji. Dla elementów znajdujących się w partii transportowej oblicza się całkowity czas obróbki ze wzoru (6) [55, 60]:

$$T_{SBB} = p \sum_{i=1}^m t_i \quad (6)$$

gdzie: t_i – czas jednostkowy obróbki pojedynczego elementu, p – liczba elementów w partii transportowej, m – liczba operacji technologicznych.

Jeżeli natomiast gniazdo, linia produkcyjna lub jej część zagregowana w BB pracuje w równoległym przebiegu produkcji (każda kolejna operacja technologiczna od-

bywa się natychmiast po wykonaniu operacji poprzedniej dla pojedynczej sztuki obrabianego przedmiotu), wzór na długość całego cyklu produkcyjnego dla serii produkcyjnej przybiera postać [55, 60]:

$$T_R = n \sum_{i=1}^m t_i + (n - p) \max_i t_i \quad (7)$$

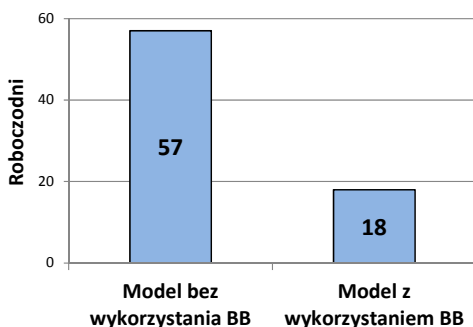
gdzie n – liczba obrabianych przedmiotów.

Przy wyznaczaniu czasu cyklu dla partii transportowej posłużono się równaniem (8), w celu oddania dynamiki systemu (pierwsza partia transportowa przebywa znacznie dłużej od kolejnych w wyniku zapełniania się BB elementami) [55, 60]:

$$T_{\text{RBB}} = \begin{cases} p \sum_{i=1}^m t_i & \text{dla pierwszej partii transportowej} \\ p \max_i t_i & \text{dla kolejnych partii transportowych} \end{cases} \quad (8)$$

gdzie: T_{RBB} – czas obróbki partii produkcyjnej dla równoległego przebiegu produkcji, p – liczba elementów w partii transportowej, $\max_i t_i$ – czas trwania najdłuższej operacji.

Na rysunku 42 przedstawiono porównanie czasów poświęconych na budowę modeli symulacyjnych przed i po agregacji stanowisk pracy w BB. Czasy te oszacowano na przykładzie projektu opisywanego w [55].

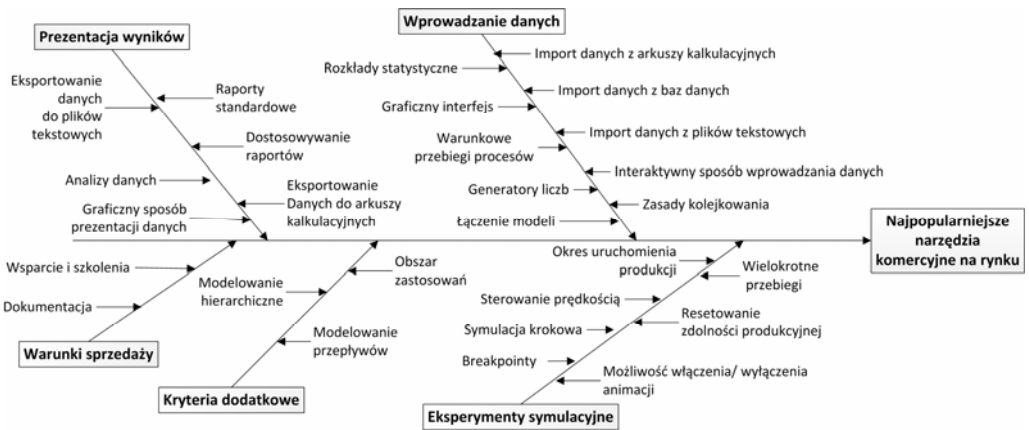


Rys. 42. Porównanie czasów poświęconych na budowę modeli symulacyjnych przed i po agregacji stanowisk pracy w BB [55]

Agregacja podobnych elementów w BB znacznie skraca czas budowy modelu symulacyjnego. Agregować można nie tylko stanowiska pracy, ale również inne elementy systemu produkcyjnego, jak np.: surowce, wyroby gotowe, zasoby ludzkie, środki transportu i inne. Decyzja o wprowadzeniu BB powinna zależeć od potrzebnego w badaniach symulacyjnych poziomu szczegółowości.

3.2.3. KRYTERIA WYBORU PAKIETU SYMULACYJNEGO

Na czas realizacji projektu symulacyjnego wpływa również wybór oprogramowania, w którym zostanie zbudowany model, a następnie zostanie poddany eksperymentom symulacyjnym. Oczywiście zasadniczym wymaganiem stawianym oprogramowaniu do modelowania i symulacji jest poprawność logiczna i matematyczna, ale coraz większą uwagę użytkownicy przykładają do dodatkowych funkcji przy wyborze pakietów komercyjnych. Na rysunku 43 pokazano najważniejsze kryteria uwzględniane podczas wyboru komercyjnego programu do modelowania i symulacji. Kryteria te zostały wskazane na podstawie wyników ankiet przeprowadzonych na zespołach ekspertów z zakresu modelowania i symulacji, zatrudnionych w dużych międzynarodowych korporacjach [195]. Badaniom poddano ponad pięćdziesiąt komercyjnych programów do modelowania i symulacji. Na rysunku 43 pokazano jedynie pięć z ośmiu zawartych w ankietach kategorii cech użytkowych programów oraz umieszczono jedynie te cechy, które uzyskały największą liczbę punktów w ocenie ekspertów.



Rys. 43. Najważniejsze kryteria brane pod uwagę w wyborze programów do modelowania i symulacji [195]





Jak wynika z rysunku 43, duży wpływ na wybór programu do modelowania i symulacji ma import oraz eksport danych do plików zewnętrznych. Tego typu funkcja jest bardzo przydatna ze względu na powszechne stosowanie w przedsiębiorstwach produkcyjnych systemów typu CAx, PLM, MES, MRP II/ ERP oraz CRM i SCM. Możliwość importu (zacytania) danych do programu symulacyjnego znacznie skraca czas jego budowy oraz umożliwia ich bieżącą aktualizację w opracowanym modelu. Z kolei eksport danych ułatwia aktualizację dokumentacji analizowanego systemu produkcyjnego oraz elastyczną możliwość prezentacji wyników.

Największą liczbę punktów w przeprowadzonej analizie wyników ankiet otrzymało osiem programów do modelowania i symulacji. Były to w kolejności alfabetycznej

[195]: Arena 5.0 (Rockwell Software), AutoMod 9.1 (Brooks Automation), Enterprise Dynamics 3.1 (Enterprise Dynamics), Extend 5.0 (Imagine That Inc.), ProModel 2001 (Promodel Corporation), Quest (DELMIA Corporation), Simul8 6.0 (Simul8 Corporation), i Witness 2000 (Lanner Group, Inc.)

Z kolei w tabeli 5 zawarto porównanie czterech komercyjnych programów do modelowania i symulacji. Wybrane kryteria są, zadaniem autorki, najważniejsze z perspektywy możliwości zastosowania systemów informatycznych do analizy i oceny ryzyka oraz stabilności systemów produkcyjnych. Do tabeli 5 wybrano jedynie te oprogramowania, które wykorzystywano w prezentowanych w niniejszej pracy przykładach praktycznych oraz podczas realizacji projektów naukowo-badawczych i dla przemysłu.

Tabela 5. Porównanie wykorzystanych w badaniach narzędzi informatycznych do modelowania i symulacji procesów produkcyjnych

	ProModel Corporation USA 	Corel Corporation USA 	SDZ GmbH Niemcy 	Lanner Group Witness Optimizer UK 
Łatwość budowy modelu	2	1	2	2
Czas nauki systemu	3	2	2	3
Animacja w modelu	1	3	3	1
Możliwość modelowania hierarchicznego procesów	5	1	5	4
Wprowadzanie charakterystyk zmiennych losowych	3	1	2	1
Możliwość modelowania łańcuchów logistycznych	1	4	2	1
Możliwość modelowania layoutów	1	4	2	2
Możliwość prezentacji wyników	1	1	1	1
Funkcjonalność modelowania	1	2	1	1
Implementacja metod zarządzania	5	1	4	1
Możliwość umieszczania kolejnych warstw w modelu	5	1	5	3
LEGENDA:	1 – bardzo dobra, 2 – dobra, 3 – średnia, 4 – słaba, 5 – żadna			

Jednymi z najbardziej istotnych cech oprogramowania, wykorzystywanego w analizie i ocenie ryzyka oraz ocenie stabilności systemów produkcyjnych, jest możliwość modelowania hierarchicznego, umieszczania kolejnych warstw w modelu oraz łatwego wprowadzania charakterystyki zmiennych losowych. Modelowanie hierarchiczne oraz umieszczanie kolejnych warstw (np. z dokumentami, zasobami itd.) umożliwia dostosowanie poziomu szczegółowości danego obszaru systemu produkcyjnego do pro-

blemu. Kolejne dekompozycje lub warstwy można wprowadzać w wybranym obszarze bez konieczności budowania nowych modeli, co zaoszczędza czas prowadzonych analiz. Rozwiązanie to ułatwia również prowadzenie szczegółowych analiz dla obszarów, w których np. poziom ryzyka jest duży, a pozostałe obszary systemu pozostają bez zmian. Pożądaną cechą jest również łatwość wprowadzania charakterystyki zmiennych losowych. Dzięki temu możliwe jest szybkie wprowadzenie danych na temat czynników zakłócających przebieg procesu. W ten sposób w krótkim czasie analizowany model znacznie lepiej odwzorowuje system rzeczywisty.

Tabela 6. Wady i zalety stosowania symulacji [6, 37, 55, 124]

Zalety stosowania symulacji	Wady stosowania symulacji
<p>1. Symulacja ułatwia ustalenie postaci modelu decyzyjnego za pomocą eksperymentów bezpośrednio przeprowadzonych na badanym procesie, jednak bez ingerencji w system rzeczywisty.</p> <p>2. Może być stosowana do analizy dużych i złożonych problemów decyzyjnych, które nie mogą być rozwiązane za pomocą innych metod (np. badań operacyjnych).</p> <p>3. Umożliwia szybkie przygotowanie decyzji dzięki analizie efektów eksperymentów przeprowadzonych dla wielu, następujących po sobie okresów. Dodatkowo jest możliwość badania kilku lat działalności systemu w ciągu minut, ponieważ symulacja umożliwia kondensowanie czasu.</p> <p>4. Dostarcza odpowiedzi na pytanie typu „co, jeśli ...?”. Eksperymenty symulacyjne umożliwiają przebadanie różnych alternatyw decyzyjnych.</p> <p>5. Ułatwia analizę współzależności efektów składowych zmiennych modelu mających wpływ na wybór decyzji w warunkach ekstremalnych.</p> <p>6. Umożliwia wprowadzenie do modelu dowolnych zmiennych o charakterze losowym, przez co łatwo ocenić ryzyko związane z podjętą decyzją.</p> <p>7. Daje możliwość przeprowadzenia badań na systemie nieistniejącym, planowanym, który ma się pojawić dopiero w przyszłości.</p>	<p>1. Brak szczegółowych reguł co do budowy modeli symulacyjnych. W procesie modelowania dużą rolę odgrywa wiedza i doświadczenie modelatora.</p> <p>2. Długi czas budowy modeli. Do ich budowy, oprócz zebrania danych, potrzebna jest bardzo dobra znajomość modelowanego systemu.</p> <p>3. Każdy model symulacyjny ma charakter unikatowy. Jego rozwiązania nie mogą być stosowane do analizy innych problemów decyzyjnych.</p> <p>4. Nie ma pewności, że opracowywany model będzie działał poprawnie i dawał właściwe rezultaty.</p> <p>5. Pozwala przygotować alternatywne rozwiązania decyzyjne w kolejnych eksperymentach, ale nie są to rozwiązania optymalne dla każdego warunków.</p> <p>6. 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.</p> <p>7. Rezultaty symulacji mogą być bardzo niezrozumiałe, mogą stwarzać problemy w trakcie ich interpretacji.</p>

W rozwoju oprogramowania do modelowania i symulacji zauważa się również tendencję do zwiększania funkcjonalności. Możliwość implementacji różnych metod organizacji produkcji umożliwia kompleksowe podejście do reorganizacji systemów produkcyjnych. Dzięki temu wyniki uzyskiwane za ich pomocą mają większe znaczenie praktyczne.

Z drugiej jednak strony należy zaakceptować to, że zbudowany model nigdy dokładnie nie opisze skomplikowanego systemu rzeczywistego. Dlatego budowanie mo-

delu jest sztuką i wymaga dużego doświadczenia, pomocnego w wyborze odpowiednich elementów i parametrów do modelowania. W tabeli 6 przedstawiono wady i zalety stosowania symulacji.

Symulacja jest jedną z ważniejszych technik wspomagających zarządzanie produkcją. Modele symulacyjne rozwiązują te problemy zarządzania firmą, które cechuje wysoki poziom złożoności, co oznacza, że istnieje wiele alternatyw osiągnięcia celów [54]. Wiąże się to z tym, że w warunkach gospodarki rynkowej przedsiębiorstwa muszą rozwiązywać coraz to bardziej złożone problemy w coraz to krótszym czasie. W podejmowaniu decyzji, analizie i projektowaniu systemów produkcyjnych zachodzi konieczność uwzględnienia wielu danych. Również duża liczba możliwych wariantów rozwiązań i ich złożoność utrudnia podjęcie decyzji. Szybki rozwój techniki komputerowej i programów symulacyjnych umożliwia wykorzystanie tej techniki niemal w każdej pracowni projektowej i komórce zajmującej się zarządzaniem w przedsiębiorstwie [214].

Przykład 5

Zastosowanie modelowania i symulacji w reorganizacji linii produkcyjnej wiązek elektrycznych

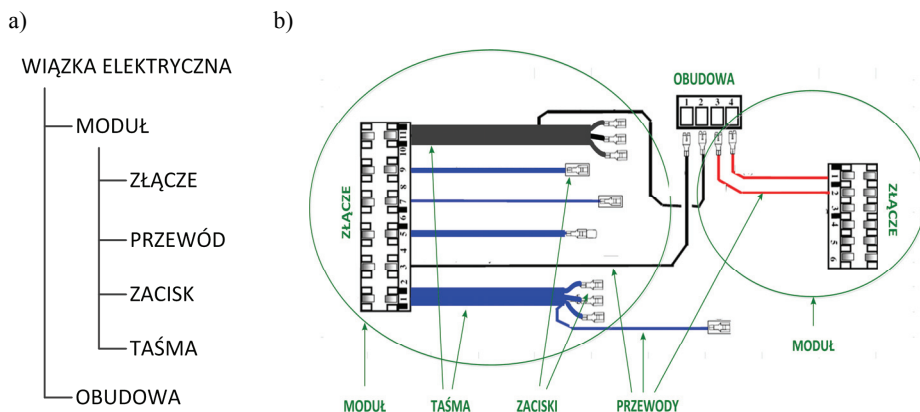
Rozwijające się przedsiębiorstwo, wytwarzające wiązki elektryczne do zmywarek Electrolux, planowało w następnych latach zwiększyć plan produkcji o 30 do 40%, aby sprostać rosnącym zamówieniom. W tym celu należało przeprowadzić reorganizację obecnego systemu produkcyjnego. Ponieważ planowana reorganizacja była złożonym problemem decyzyjnym o wielu alternatywnych wariantach rozwiązań, postanowiono posłużyć się modelowaniem i symulacją komputerową. Możliwość oceny wpływu planowanych decyzji na system produkcyjny umożliwiało wybór najlepszego wariantu decyzyjnego i zapewnienie stabilności dalszego funkcjonowania. Planowane decyzje odnośnie do reorganizacji systemu produkcyjnego dotyczyły:

- zwiększenia zdolności produkcyjnych przez zwiększenie wydajności wąskich gardeł,
- przeprowadzenia optymalizacji obciążenia zasobów produkcyjnych ze względu na bardziej równomierne obciążenie stanowisk pracy i pracowników,
- zaproponowania nowego rozmieszczenia stanowisk pracy na hali produkcyjnej w celu zmniejszenia długości dróg transportowych,
- zmniejszenia poziomu zapasów produkcji w toku.

Do realizacji tych zadań wybrano program do modelowania i symulacji systemów produkcyjnych – ProModel, w którym zbudowano modele symulacyjne analizowanego systemu oraz poddano je optymalizacji ze względu na wyznaczone kryteria. Na wybór programu zdecydowano się, ze względu na możliwość przeprowadzenia szczegółowej analizy rozmieszczenia stanowisk roboczych.

Charakterystyka procesu produkcyjnego

W analizowanym zakładzie wytwarzanych jest około 700 różnych typów wyrobów. Wszystkie wyroby charakteryzują się dużym podobieństwem struktury oraz technologii wytwarzania. Każda wiązka elektryczna składa się z tzw. modułów, a moduł z przewodów zakończonych zaciskami. Zarówno liczba modułów, jak i liczba przewodów może być różna w zależności od typu wiązki elektrycznej. Niektóre przewody łączone są za pomocą taśmy izolacyjnej. Moduły łączone są w obudowie. Na rysunku 44a przedstawiono strukturę budowy wiązki elektrycznej, natomiast na rysunku 44b schemat budowy przykładowej wiązki.



Rys. 44. a) Struktura budowy wiązki elektrycznej, b) schemat budowy wybranej wiązki elektrycznej

Ze względu na dużą liczbę produkowanych typów wyrobów do analizy wybrano 3 typy wiązek, charakteryzujących się największą liczbą modułów, a przez to najdłuższym czasem wytwarzania. Dla wybranych wyrobów przyjęto program produkcji przedstawiony w tabeli 7.

Tabela 7. Przyjęty program produkcji i liczba modułów w wybranych do analizy typach wiązek elektrycznych

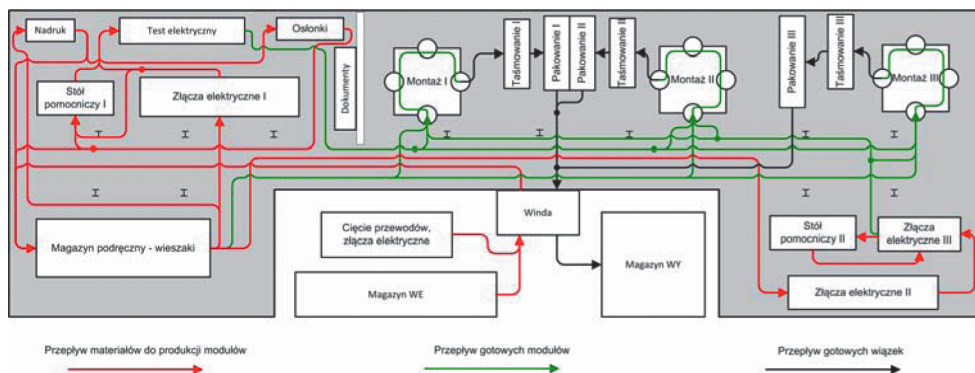
Nazwa wiązki	Liczba modułów [szt.]	Wielkość programu produkcji szt./zmianę
A	11	300
B	12	300
C	9	300

Wybrane typy wiązek produkowane są na tej samej hali produkcyjnej. Transport pomiędzy stanowiskami wykonywany jest przez pracowników produkcyjnych. Wiązki transportowane są na tzw. wieszakach. Nazwy stanowisk, ich rozmieszczenie oraz przepływ materiałów przedstawiono na rysunku 45.

Ze względu na duże podobieństwo wyrobów w tabeli 8 przedstawiono tylko jedną kartę technologiczną produkcji wyrobu A. Sumaryczny czas operacji techno-

logicznych dla wiązki A wynosi 793 s. Odpowiednio dla wiązki B suma czasów operacji technologicznych to 821 s, a dla wiązki C 776 s.

Do pierwszego modelu, nazwanego modelem stanu obecnego, wykorzystano dane organizacyjne, technologiczne i logistyczne analizowanego procesu. Za okres analizy przyjęto 1 tydzień.



Rys. 45. Layout hali produkcyjnej oraz przepływ elementów w produkcji wiązek elektrycznych

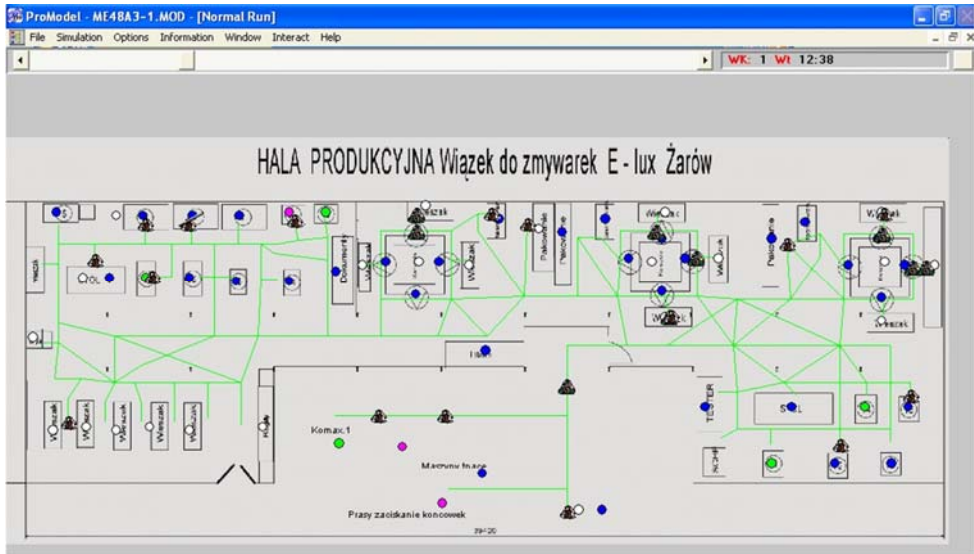
Tabela 8. Karta technologiczna wyrobu A

Nr operacji	Nazwa operacji	Czas/ 1 szt. [s]	Liczba/1 operację [szt.]	Czas sumaryczny [s]
10	Cięcie przewodów	2	6	12
20	Nadruk na przewodzie	5	4	20
30	Zaciskanie końcówek	3	24	72
40	Zakucie ręczne podwójne	5	2	10
50	Zakładanie osłonek	3	13	39
60	Aplikacja: 1 przewód	4	1	4
70	Aplikacja: 2 przewody	8	6	48
80	Aplikacja: 3 przewody	12	1	12
90	Aplikacja: 4 przewody	16	1	16
100	Aplikacja: 6 przewodów	24	1	24
110	Układanie	6	38	228
120	Taśmowanie (taśma 130 mm)	30	1	30
130	Taśmowanie (taśma 160 mm)	45	1	45
140	Scalanie	5	23	115
150	Kontrola wpięcia	4	13	52
160	Kontrola wpięcia	6	6	36
170	Pakowanie	30	1	30
Czas produkcji 1 szt. wyrobu A				793

Sposób budowy i wyniki uzyskane w modelu stanu obecnego

Budowa modelu stanu obecnego miała na celu porównanie wyników z kolejnymi modelami, w których zostaną wprowadzone zmiany organizacyjne. Na

tym modelu przeprowadzono również proces walidacji poprzez porównanie wyników z wynikami osiąganymi przez rzeczywisty system produkcyjny. Na rysunku 46 przedstawiono zrzut ekranowy modelu stanu obecnego, wykonanego w programie ProModel.



Rys. 46. Model stanu obecnego

Inne założenia przyjęte w budowie modelu stanu obecnego:

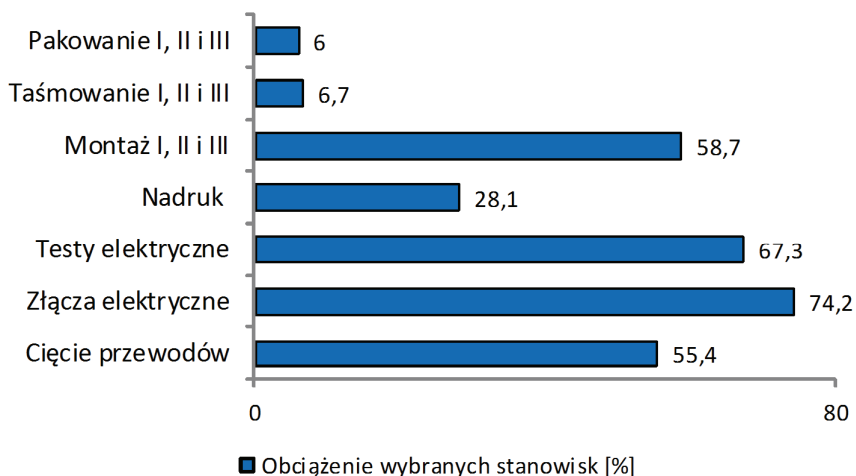
- długości dróg transportowych wyznaczono na planie rozmieszczenie stanowisk produkcyjnych,
- uwzględniono produkcję wszystkich modułów składających się na wybrane do analizy wiązki,
- operacje technologiczne zamodelowano, opierając się na czasach jednostkowych zamieszczonych w kartach procesu technologicznego,
- operacje montażu zamodelowano, kierując się informacją o osiągniętej wydajności 300 szt./zmianę,
- w modelu uwzględniono, oprócz zasobów na linii produkcyjnej, również wszystkie inne zasoby potrzebne do wytwarzania modułów zamieszczonych w strukturze wyrobu, w tym jednostki transportowe.

Po przeprowadzeniu eksperymentów symulacyjnych na modelu uzyskano następujące wyniki:

1. Zgodnie z przyjętymi założeniami, w modelu stanu obecnego zrealizowano tygodniowy plan produkcji. Czas produkcji potrzebny do zrealizowania założonego programu produkcji wynosił ok. 110 h, co oznacza, że realizacja procesu wy-

twórczego zostałyby zakończona w piątek, godzinę przed zakończeniem ostatniej zmiany pracy.

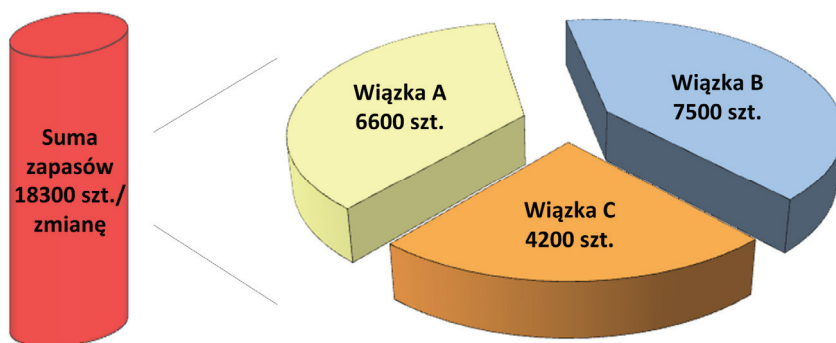
2. W założonym programie produkcyjnym w modelu nie wystąpiły wąskie gardła. Niezadowalające może być jedynie nierównomierne obciążenie stanowisk pracy. Otrzymane obciążenia wybranych stanowisk pracy przedstawiono na rysunku 47.



Rys. 47. Obciążenia wybranych stanowisk w modelu stanu obecnego [%]

3. Analiza wielkości zapasów produkcji w toku pokazała, że poziom zapasów montowanych modułów wynosi 18 300 szt./zmianę i rozkłada się w różny sposób na poszczególne wiązki, co przedstawiono na rysunku 48.

Uzyskany w modelu pierwszym poziom zapasów jest bardzo wysoki. Uwzględniając liczbę modułów wchodzących w skład poszczególnych wiązek, za wystarczający poziom zapasów można uznać 9 600 szt./zmianę.



Rys. 48. Wielkości zapasów modułów na analizowanej linii produkcyjnej

4. W modelu występują długie odcinki dróg transportowych o znacznym natężeniu ruchu. Ponieważ transport elementów wykonują pracownicy produkcyjni, oznacza to, że tracą dużo czasu na wykonywanie czynności transportowych.

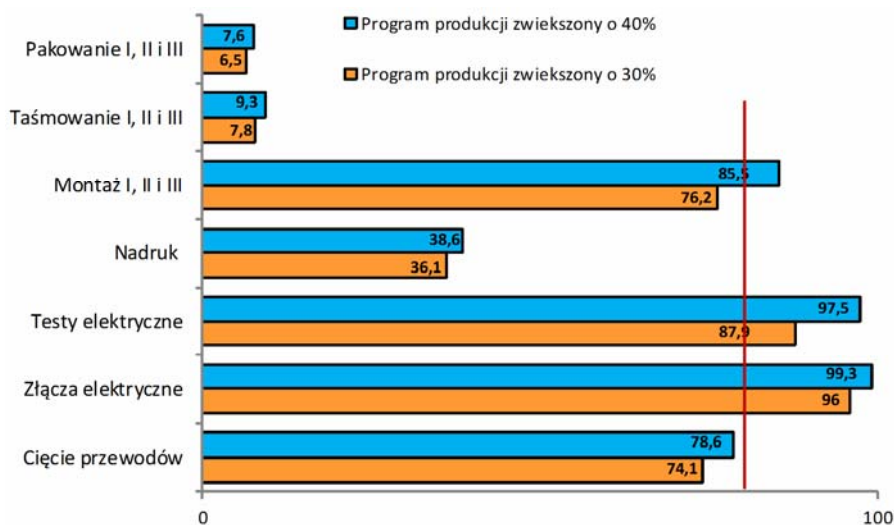
Sposób budowy i wyniki uzyskane w modelu 2

Model 2 został zbudowany na bazie modelu stanu obecnego, w którym zwiększony został program produkcji o 30%, a następnie o 40%. Zwiększony tygodniowy program produkcji przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Program produkcji przyjęty w modelu 2

	Program produkcji zwiększony o 30% [szt./zmianę]	Program produkcji zwiększony o 40% [szt./zmianę]
Wiązka A	390	420
Wiązka B	390	420
Wiązka C	390	420

Otrzymane obciążenia stanowisk pracy, w wyniku przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych na modelu 2, przedstawiono na rysunku 49.



Rys. 49. Obciążenia wybranych stanowisk pracy otrzymane w modelu 2 [%]

Jak wynika z rysunku 49, bez przeprowadzenia zmian organizacyjnych nie ma możliwości zwiększenia programu produkcji o 30–40%. Ponieważ proces produkcyjny nie jest zautomatyzowany, to obciążenie przekraczające 80% jest zbyt duże. Stanowiska montażu I, II i III, stanowisko testów elektrycznych oraz złącza elektrycznych są wąskim gardłem przy zwiększonym programie produkcji.

Również poziom zapasów produkcji w toku wzrósł odpowiednio do 23 790 szt./zmianę w przypadku zwiększenia programu produkcji o 30% oraz do 25 620 szt./zmianę, gdy program produkcji zwiększono o 40%. Tutaj rozwiązaniem było wprowadzenie systemu ssącego. Za stymulatory procesu produkcyjnego wybrano gniazda montażu I, II i III.

Wyniki z modelu 2 potwierdziły przypuszczenia, że analizowany proces wytwórczy charakteryzuje się strukturą produkcyjną i organizacyjną niedopasowaną do planowanego zwiększenia ilości produkowanych wyrobów. W trakcie analiz wyników eksperymentów z drugiego modelu symulacyjnego zauważono również problem zbyt długich dróg transportowych, które przy zwiększonym programie produkcyjnym mogą być zbyt bardzo obciążone, co może powodować zakłócenia. W znacznej mierze przyczynia się do tego ilość zapasów produkcji w toku, które znajdując się przy stanowiskach dodatkowo powodują zmniejszenie przepustowości dróg, po których transportowane są elementy. Problem ten był widoczny szczególnie między stanowiskami złączy i testów elektrycznych a stanowiskami montażu.

*Sposób budowy w modelu 3 i wyniki uzyskane
po wprowadzeniu zmian organizacyjnych*

W prawidłowo zaprojektowanej strukturze przestrzennej stanowisk pracy można osiągnąć wymierne korzyści: skrócenie całkowitego cyklu produkcji i obniżenie kosztów dzięki redukcji zbędnych przemieszczeń, przeładunku i manipulacji. Po uzgodnieniach z kierownictwem zakładu możliwych do przeprowadzenia zmian organizacyjnych zdecydowano się na:

1. Modernizację stanowiska testów elektrycznych. Planowane zmiany modernizacyjne powinny zapewnić wzrost wydajności tego stanowiska o 30%.

2. Ponieważ stanowiska do pakowania I, II i III oraz stanowiska do taśmowania I, II i III są obciążone tylko w około 6–7%, zdecydowano się zrezygnować z dwóch z nich i pozostawić tylko po jednym z nich do taśmowania i pakowania. W ten sposób można było zaoszczędzić powierzchnię na hali produkcyjnej. Warunkiem do przeprowadzenia tego rozwiązania było znalezienie miejsca dla tych stanowisk w pobliżu wszystkich trzech gniazd montażowych.

3. W przypadku stanowiska złącza elektryczne zdecydowano się na przeniesienie części operacji pomocniczych na stół pomocniczy I i II, który w pierwotnej wersji był bardzo mało obciążony i w zasadzie pełnił jedynie funkcję magazynu przystanowiskowego.

Podczas projektowania nowego layoutu konieczne było również uwzględnienie ograniczeń:

- kształt hali produkcyjnej (długi i wąski prostokąt z wcięciem na klatkę schodową – rys. 45),
- dwa rzędy słupów nośnych, narzucających m.in. umiejscowienie dróg transportowych (por. rys. 45),

- położenie windy (por. rys. 45),
- umiejscowienie magazynów WE i WY, operacji cięcia i złączy elektrycznych, których położenie poza halą produkcyjną nie mogło się zmienić (na rys. 45 ich położenie zaznaczono w sposób schematyczny),
- specyficznych wymagań co do odległości od innych obiektów w przypadku gniazd montażowych.

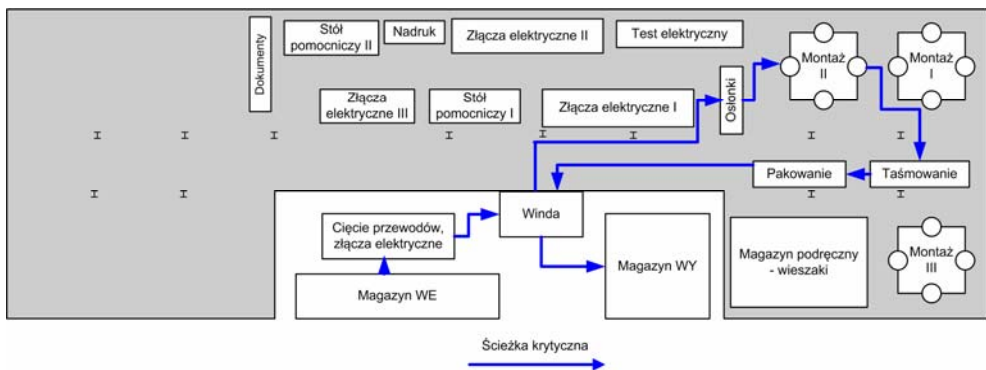
Dodatkowo przeprowadzono optymalizację rozmieszczenia stanowisk roboczych na istniejącej hali produkcyjnej. W tym celu posłużono się metodą analizy kolejności przebiegu operacji, nazywaną czasami metodą ścieżki krytycznej. Za główne kryterium oceny poprawności rozmieszczenia wybrano minimalną odległość połączeń transportowych [53, 149] koniecznych do realizacji procesu produkcyjnego w założonym czasie.

$$\text{Minimalna odległość połączeń transportowych} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} C_{ij} \quad (9)$$

gdzie: n – liczba stanowisk pracy, x_{ij} – liczba jednostek, ładunków lub osób przemieszczanych pomiędzy stanowiskami i oraz j , C_{ij} – odległość pomiędzy stanowiskami i oraz j .

W ramach prac projektowych wykorzystano analizę kolejności przebiegu operacji, opierając się na analizie kart i marszrut technologicznych wyznaczono liczbę przemieszczeń między stanowiskami. W tym celu sporządzono ukierunkowaną macierz transportową [53]. Z przeprowadzonej analizy wynika, iż na dużej części dróg transportowych zapewniony powinien być ruch dwukierunkowy, co może prowadzić do zakłóceń. W związku z tym należało przewidzieć odpowiednie szerokości dróg transportowych.

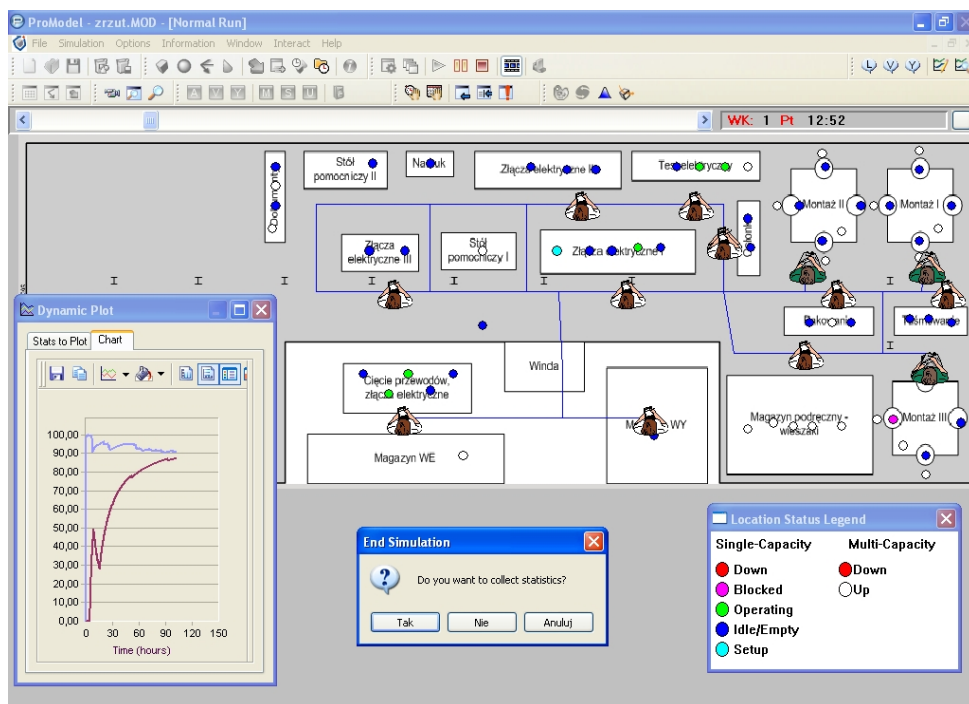
Prezentowane na rysunku 50 nowe rozmieszczenie stanowisk roboczych zostało przeanalizowane w trzecim modelu symulacyjnym.



Rys. 50. Nowy layout z zaznaczoną ścieżką krytyczną przepływu materiałów [53]

Podczas projektowania nowego layoutu szczególną uwagę zwrócono na to, aby odległości pomiędzy stanowiskami pracy, leżącymi na ścieżce krytycznej, były minimalne. W modelu drugim obciążenie trzech stanowisk taśmowania i pakowania było bardzo małe (7%). Dzięki ustawieniu gniazd montażu blisko siebie można było zrezygnować z dwóch stanowisk taśmowania i pakowania. Dzięki temu rozwiązaniu udało się zaoszczędzić znaczną ilość przestrzeni na hali produkcyjnej, która będzie przydatna w dalszym zwiększaniu planów produkcyjnych i wprowadzaniu do produkcji nowych wyrobów.

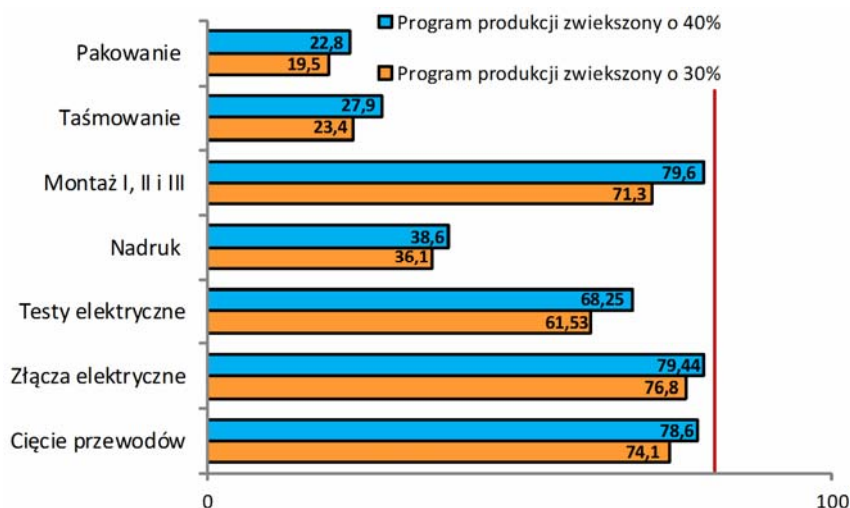
Na tak zmodyfikowanym layoutcie przeprowadzono eksperymenty symulacyjne w modelu trzecim. Na rysunku 51 przedstawiono widok ekranu z modelu trzeciego.



Rys. 51. Model symulacyjny zawierający zmiany layoutu [53]

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych uzyskano obciążenia stanowisk roboczych, które wskazują, że możliwa jest realizacja zwiększonego programu produkcji, co przedstawiono na rysunku 52.

Po porównaniu wyników modelu 3 z wynikami modelu 1 stanu obecnego stwierdzono, że nowe rozmieszczenie stanowisk pracy skróciło drogi transportowe o 14,4 km w ciągu tygodnia. Na jednego pracownika skrócenie drogi zostało oszacowane średnio na poziomie 0,8 km/tydzień. Przekłada się to w sposób jednoznaczny na szybsze zakończenie realizacji procesu produkcyjnego.



Rys. 52. Obciążenia wybranych stanowisk roboczych uzyskane z eksperymentów na modelu 3 [%]

Na podstawie wyników symulacji sporządzono wykresy Sankeya, obrazujące natężenie przepływu materiałów w modelu 1 i 3. Analizując rozmieszczenie w modelu 1, stwierdzono, że charakteryzuje się dużą długości dróg transportowych o znacznym natężeniu czynności transportowych. W modelu 3 odcinki dróg transportowych o dużym natężeniu ruchu są znacznie krótsze.

Reorganizacja przepływu materiałów w badanym przedsiębiorstwie została wykonana planowanym, zwiększonym planem sprzedaży. Wykonane modele symulacyjne w trakcie prac projektowych pomogły przeprowadzić reorganizację procesu produkcyjnego, bez ingerencji w rzeczywisty system produkcyjny. Opracowane zmiany zostały zweryfikowane, a warianty możliwych decyzji poddane szczegółowej analizie. Opracowane modele ułatwiły dostosowanie zdolności produkcyjnej do nowych planów produkcyjnych oraz przeprowadzenie optymalizacji reorganizowanego systemu produkcyjnego ze względu na wyznaczone kryteria optymalizacyjne.

Przykład 6

Zastosowanie modelowania i symulacji w reorganizacji zakładu produkującego ramy wózków

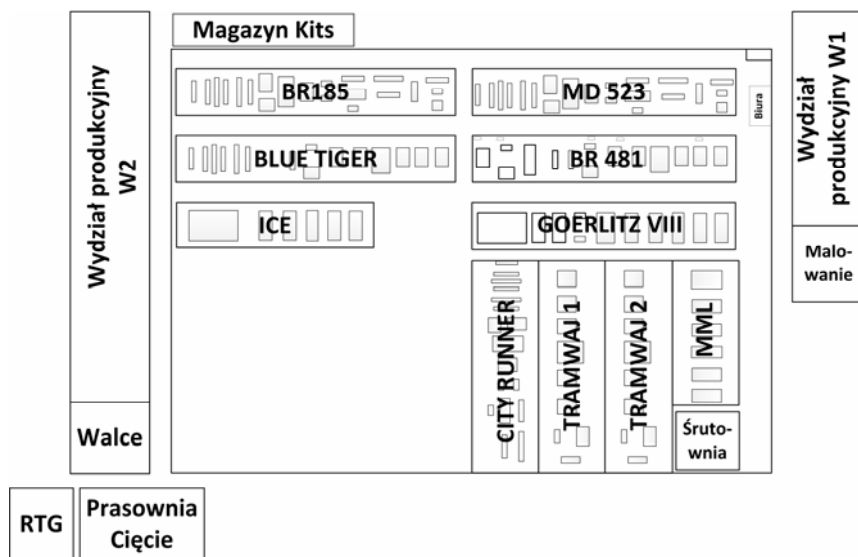
Projekt realizowany był we wrocławskim oddziale międzynarodowego koncernu zajmującego się produkcją wózków do wagonów towarowych, pasażerskich i tramwajów. Potrzeba reorganizacji obecnego systemu produkcyjnego spowodowana była zmianą programu i profilu produkcji w związku z programem dostosowania zakładu do nowych wymogów koncernu. Ze względu na złożoność decyzyjną pro-

blemu postanowiono posłużyć się modelowaniem i symulacją komputerową. Przeprowadzenie 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 reorganizacji zakładał zwiększenie zdolności produkcyjnych zakładu z 400 wózków do 1500 sztuk ram wózków rocznie. Dodatkowo zaplanowano uruchomienie produkcji czterech nowych produktów, dla których w momencie rozpoczęcia realizacji projektu nie była znana technologia produkcji.

Jednym z wyznaczonych celów w projekcie była budowa modelu layoutu całego zakładu i jego optymalizacja pod względem długości dróg transportowych oraz całkowitego przepływu materiału wewnątrz i na zewnątrz zakładu. Należało również ustalić optymalne położenie dla maszyny pomiarowej, na której przeprowadzana będzie końcowa kontrola wszystkich wyrobów.

Założenia i sposób realizacji projektu

Zaplanowana produkcja miała odbywać się w hali produkcyjnej o powierzchni 10 000 m², w obrębie której wydzielono 10 linii produkcyjnych (tzw. naw). Ze względu na czasochłonne przebrojenie, rozmiary produktów, stanowisk pracy oraz specjalistyczne oprzyrządowanie, każdy produkt wytwarzany jest w innej nawie produkcyjnej. Plan zakładu oraz projekt rozmieszczenia produkcji poszczególnych wyrobów w nawach produkcyjnych przedstawiono na rysunku 53.



Rys. 53. Plan zakładu oraz wstępny projekt usytuowania naw produkcyjnych [32, 36]

Całość produkcji sterowana jest za pomocą tzw. pojemników kits. Pojemniki te zawierają elementy potrzebne do produkcji danego typu ramy. Liczba pojemników kits jest różna i zależy od stopnia skomplikowania danego produktu. Kitsy kompletowane są w magazynie i wywożone do hali produkcyjnej za pomocą wózków widłowych. Również w trakcie procesu produkcyjnego wyroby lub ich elementy kilkakrotnie wywożone są na zewnątrz hali, do operacji zewnętrznych lub do kooperacji. Transport elementów wewnątrz naw odbywa się za pomocą suwnic, a poza nimi za pomocą wózków.

Ponieważ zarówno technologia, jak i organizacja wszystkich procesów produkcyjnych w zakładzie jest podobna, postanowiono przeprowadzić analizę wyrobu reprezentatywnego, na który wybrano ramę wózka MD 523, a w przypadku pozostałych wyrobów zastosować tzw. współczynniki przeliczeniowe. Współczynniki te określają podobieństwo konstrukcyjno-technologiczne w stosunku do wyrobu reprezentatywnego. Założony roczny plan produkcji, oraz przyjęte współczynniki przeliczeniowe, przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Plan sprzedaży, potrzebna liczba pojemników kits oraz użyte współczynniki przeliczeniowe [32]

Lp.	Nazwy projektów	Liczba	KITS/ROK	Wydajność szt./tydz.	Współczynnik przeliczeniowy
Ramy lokomotywowe		300	900		
1	Projekt BR 185	100	400	2	1,7 × MD 523
2	Projekt Blue Tiger	50	250	1	1,9 × MD 523
3	Projekt ICE	150	350	2	1,6 × MD 523
Ramy regionalne		900	3000		
1	Projekt MD 523 (wyrób reprezentatywny)	400	1000	10	znana
2	Projekt Goerlitz	300	1200	2	1,4 × MD 523
3	Projekt BR 481	200	800	4	1,2 × MD 523
Ramy tramwajowe		300	1200		
1	Projekt Cityrunner	100	800	2	1,1 × MD 523
2	Projekt inny	100	800	2	1,1 × MD 523
3	Projekt inny	100	800	2	1,1 × MD 523
MML i komponenty		200	400		
1	Projekt hipotetyczny 1	100	200	10	0,4 × MD 523
2	Projekt hipotetyczny 2	100	200	10	0,4 × MD 523
		Σ 1700	Σ 5500		

Ponieważ produkcja planowana jest jedynie na dziesięciu nawach produkcyjnych, zgłoszono potrzebę znalezienia naw, na których istniałaby możliwość zamienności oprzyrządowania dla dodatkowych wyrobów. Problem ten był dość istotny, gdyż przebrojenie linii produkcyjnej trwa 3–7 miesięcy. Ze względu na duże rozmiary wyrobów (do 12 m długości), oraz potrzebę zwiększenia ilości produkcji, bardzo ważnym zagadnieniem było obciążenie dróg transportowych dla

wózków widłowych. Biorąc pod uwagę wyznaczone zadania, związane z projektowaniem nowego layout'u, do realizacji projektu wybrano program do modelowania i symulacji systemów produkcyjnych ProModel.

Sposób realizacji i wyniki uzyskane w etapie (2) projektu

Wybierając optymalne położenie dla maszyny pomiarowej, zbudowano i zanalizowano cztery wersje layout'ów. Różnice pomiędzy poszczególnymi wersjami, oraz długość drogi pokonywanej przez środki transportu w czasie tygodnia, przedstawiono w tabeli 11.

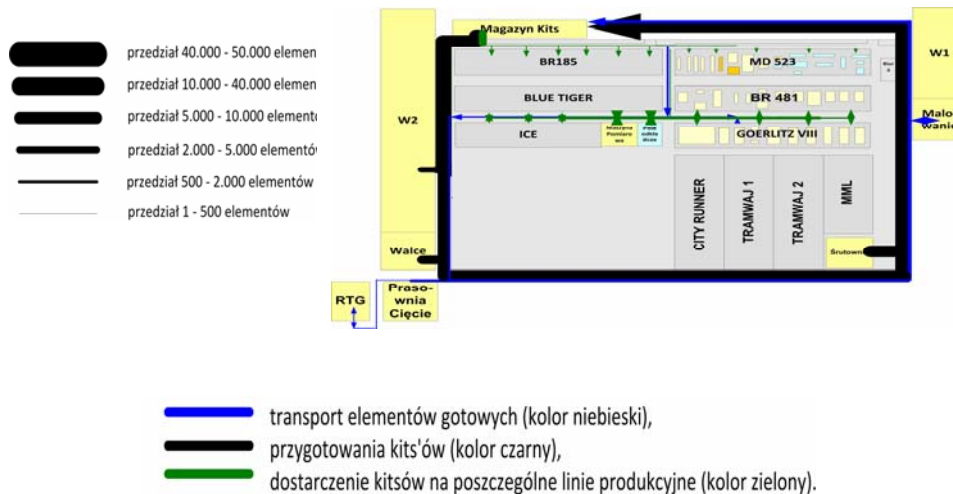
Przedstawione w tabeli 11 wyniki pokazują, że pomiędzy wersją 2 a 1 istnieje niewielka różnica, która wynika z tego, że centralne położenie maszyny pomiarowej powoduje skrócenie drogi pokonywanej przez gotowe ramy z linii produkcyjnej na maszynę pomiarową, natomiast nieznacznie wydłuża się droga z maszyny pomiarowej na RTG.

Tabela 11. Zestawienie długości dróg transportowych pokonywane przez środki transportu w poszczególnych wersjach modeli symulacyjnych

Model	Opis wersji modelu	Długość drogi pokonywanej przez wózki transportowe [km/tydz.]
Wersja 1:	Położenie maszyny pomiarowej na końcu nawy BR 185, w pobliżu dwóch bram, trzy wózki transportowe	209,19
Wersja 2:	Centralne położenie maszyny pomiarowej, trzy wózki transportowe	208,80
Wersja 3:	Centralne położenie maszyny pomiarowej, wykorzystanie wózków torowych do transportu gotowych ram na maszynę pomiarową, dwa wózki transportowe	208,30
Wersja 4:	Centralne położenie maszyny pomiarowej, wykorzystanie wózków torowych do transportu gotowych ram i kits pomiędzy magazynem a nawami poszczególnych hal produkcyjnych, dwa wózki transportowe	200,10

Ostatecznie wybrano do realizacji wersję 2, która nie wymaga dodatkowych nakładów inwestycyjnych. Wersja ta charakteryzowała się centralnym położeniem maszyny pomiarowej, co wydatnie skracało drogę, jaką pokonują gotowe ramy z poszczególnych naw produkcyjnych. Dla wybranej wersji layoutu sporządzono wykres Sankeya (rys. 54), który obrazuje obciążenia poszczególnych odcinków dróg transportowych. Wprowadzono sześć przedziałów; poszczególne grubości linii odzwierciedlają liczbę przejazdów wózka.

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



Rys. 54. Wykres Sankeya dla przyjętej wersji layoutu zakładu [42]

rozwiązania są długie drogi transportowe pomiędzy magazynem, cięciem, wałcami, prasami a śrutowaniem, z jednoczesnym wysokim stopniem natężenia operacji transportowych. Jednak z powodu kosztów związanych z inwestycjami, zmiana ta została odrzucona.

3.3. WNIOSKI I PORÓWNANIE PREZENTOWANYCH METOD MODELOWANIA

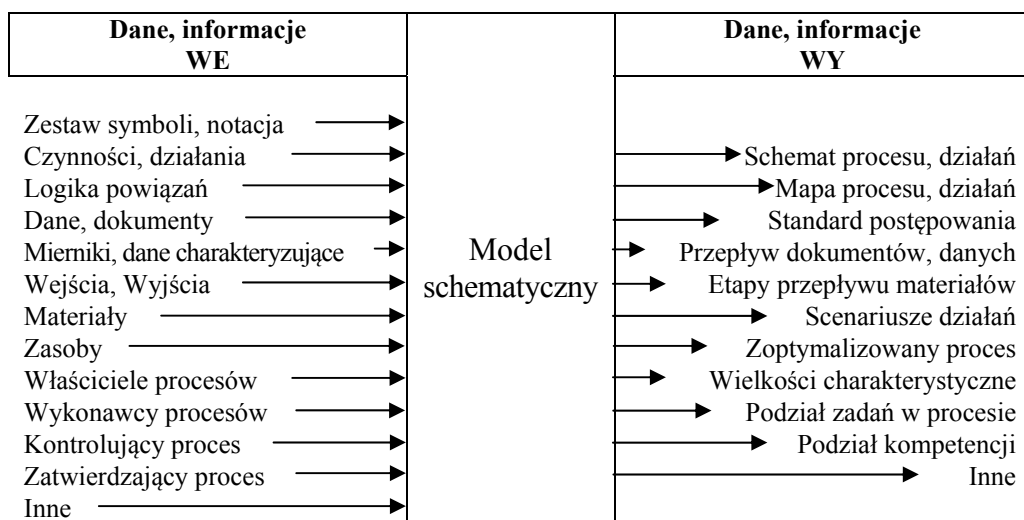
Celem modelowania systemów produkcyjnych jest z jednej strony sformalizowany opis problemu, z drugiej zaś takie przedstawienie zagadnienia, które uprości jego rozwiązanie. Zdefiniowanie modelu nie jest jednoznaczne. Dla tego samego systemu lub obiektu można zdefiniować modele różnego typu. W tabeli 12 przedstawiono porównanie opisanych w tym rozdziale metod pod względem wybranych kryteriów.

Jak wynika z tabeli 12, różne typy modeli charakteryzują się różnymi możliwościami. Wybór rodzaju modelu powinien zależeć od celu modelowania i od tego, jakie wielkości i zależności mają być analizowane. Kryteriami dodatkowymi jest czas, jaki należy poświęcić na budowę modelu, wybór oprogramowania oraz rodzaj danych, którymi należy jego zasilić. Tutaj czynnikami mogącymi znacznie skrócić czas budowy modelu jest znajomość metody i oprogramowania.

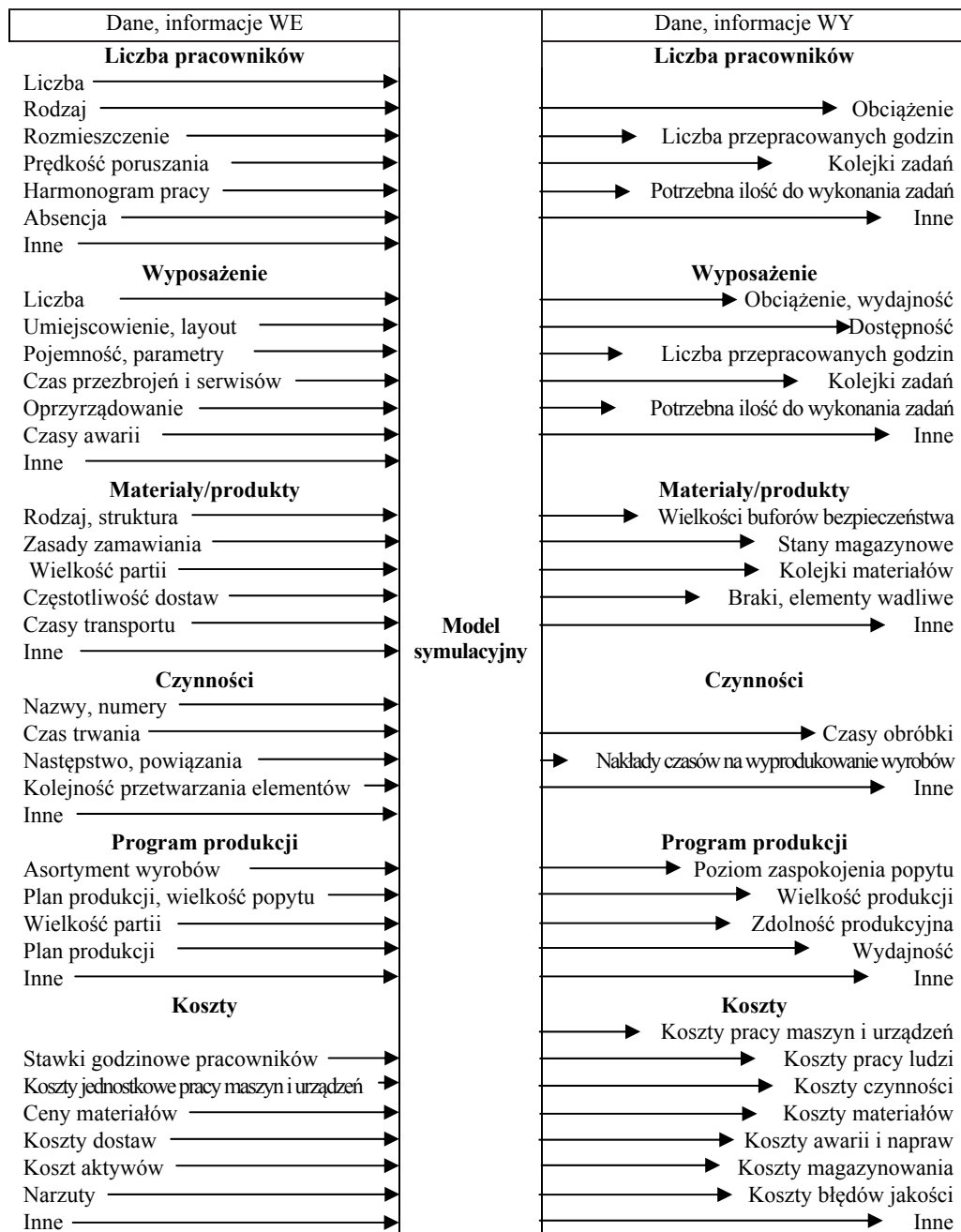
Tabela 12. Porównanie prezentowanych metod modelowania systemów produkcyjnych ze względu na wybrane kryteria

	Modele matematyczne		Modele schematyczne			Modele symulacyjne
	Schematy blokowe	Mapy procesów	Modele w notacjach biznesowych			
			IDEFO	BPMN		
Stopień skomplikowania metody	■	□	□	□	□	■
Czas poświęcony na naukę	■	□	□	□	□	■
Konieczność wykorzystywania narzędzi informatycznych	□	□	□	□	□	■
Stopień skomplikowania budowy modelu	■	□	□	□	□	■
Konieczność znajomości notacji	-	□	□	■	■	-
Konieczność posiadania doświadczenia w modelowaniu	-	□	□	□	□	■
Znajomość parametrów i charakterystyk procesu	■	-	□	□	□	■
Wykorzystanie danych liczbowych z przebiegu procesu	■	-	□	□	□	■
Możliwość modelowania hierarchicznego	□	□	□	■	■	■
Możliwość uwzględnienia dynamiki i zmian w procesie	□	-	□	□	□	■
Możliwość uwzględniania zmiennych losowych	■	-	□	□	□	■
Możliwość analizy dużych i złożonych problemów decyzyjnych	□	□	□	□	□	■
Stopień szczegółowości wyników	■	-	□	-	-	■

LEGENDA: □ – mało □ – średnio □ – dużo ■ – bardzo dużo



Rys. 55. Zestawienie danych wejściowych i wyjściowych w modelach schematycznych



Rys. 56. Najczęściej wykorzystywane dane wejściowe i wyjściowe w modelach symulacyjnych

Każdy z typów modeli charakteryzuje się innym rodzajem danych wejściowych i wyjściowych. Dane te odzwierciedlają specyfikę i zastosowanie modeli. Na rysunku 55 przedstawiono zestawienie danych wejściowych i wyjściowych charakterystycznych dla modeli schematycznych.

Na rysunku 56 ujęto zestawienie najczęściej wykorzystywanych danych wejściowych i wyjściowych w modelach symulacyjnych. Dane te wybrano na podstawie doświadczeń zebranych w trakcie budowy modeli symulacyjnych w ocenie ryzyka oraz ocenie stabilności w rzeczywistych systemach produkcyjnych.

Dobrze dobrana metoda modelowania ułatwia dostrzeżenie istotnych właściwości z perspektywy analizowanego systemu produkcyjnego oraz odpowiednio go odwzoruje. Dzięki uroszczeniom charakterystycznym dla modeli możliwe jest znalezienie optymalnych rozwiązań w systemie rzeczywistym, a następnie przeniesienie ich do systemu rzeczywistego. To z kolei wpływa na zachowanie stabilności procesów zarówno na etapie planowanych zmian, jak i później podczas ich wdrażania.

Nie ma jednak możliwości, aby zapewnić stabilność systemu produkcyjnego bez oceny, a następnie eliminacji ryzyka. Ryzyko towarzyszy każdej działalności, jednak w przypadku systemów produkcyjnych, które mają charakter techniczny, należy je traktować w szczególny sposób. Duże ryzyko może wytrącić system produkcyjny ze stanu równowagi, a w konsekwencji spowoduje niezrealizowanie celu stawianego przed systemem. Dlatego w zapewnieniu stabilności systemów produkcyjnych konieczna jest analiza, ocena, a następnie eliminacja czynników ryzyka pojawiających się losowo w każdym systemie wytwórczym.

4. ZAPEWNIENIE STABILNOŚCI SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH PRZEZ OCENĘ I ELIMINACJĘ RYZYKA

W rozdziale scharakteryzowano pojęcie ryzyka w kontekście systemu technicznego jakim jest system produkcyjny, przedstawiono metody ilościowe jego oceny proponowane przez literaturę oraz porównano je pod względem wybranych kryteriów. Ponieważ możliwości stosowania metod ilościowych są ograniczone ze względu na złożoność współczesnych przedsiębiorstw, opisano metodę FMEA. Metoda FMEA jest obecnie powszechnie stosowana w praktyce produkcyjnej, jednak nie należy do metod ilościowych, a szacowanie ryzyka opiera się na ocenie intuicyjnej osób uczestniczących w procesie produkcyjnym. Ponieważ literatura nie zapewnia metod analizy i oceny ryzyka o poziomie szczegółowości odpowiednim do specyfiki współczesnych systemów produkcyjnych, w kolejnych punktach rozdziału zaprezentowano własne metody analizy i oceny ryzyka. Do ich budowy wykorzystano właściwości struktur niezawodnościowych. Dodatkowo przedstawiono budowę współczynników wagowych, które uniezależniają wielkość wpływu czynników ryzyka na system od poziomu organizacji w przedsiębiorstwie. Zarówno proponowane metody, jak i konstrukcja współczynnika wagowego prezentowane były w pracy doktorskiej autorki [41.] Jednak, ponieważ zagadnienia te były rozwijane w publikacjach naukowych, a analiza i ocena ryzyka w systemie produkcyjnym jest warunkiem niezbędnym do zachowania przez system stabilności, zdecydowano się na ich ponowne przedstawienie w niniejszej monografii. Rozdział zilustrowano przykładem praktycznym zastosowania analizy i oceny ryzyka w analizie oraz ocenie stabilności systemu produkcyjnego.

Stabilność systemów produkcyjnych bardzo mocno zależy od występowania i wpływu czynników ryzyka. Czynniki ryzyka są stałym elementem każdego systemu produkcyjnego, pojawiają się w nim w sposób losowy, a ich wystąpienie zazwyczaj wytrąca procesy produkcyjne ze stanu równowagi. Dlatego identyfikacja czynników ryzyka, ocena jego wpływu oraz odpowiednie zarządzanie ryzykiem jest warunkiem niezbędnym do zapewnienia stabilności przebiegu procesów gospodarczych.

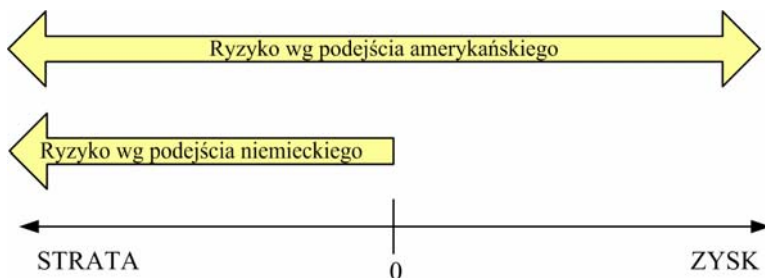
Mimo iż obecnie ryzyko działalności gospodarczej jest równie duże na rynku produkcyjnym, usługowym i finansowym, to widoczne są znaczne różnice w liczbie pozycji literaturowych, szkoleń i konferencji naukowych z tego zakresu [35, 41]. Sytuacja ta przekłada się w prosty sposób na liczbę metod planowania, 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, han-

dlowego, informatycznego i innych, natomiast zauważalny jest brak opracowań literaturowych dla przedsiębiorstw i procesów produkcyjnych.

4.1. CHARAKTERYSTYKA POJĘCIA RYZYKA I METODY JEGO OCENY

Wieloznaczność pojęcia oraz brak sprecyzowanej jasno definicji spowodowały, iż w literaturze spotkać można różne podejścia do tematu ryzyka. Najbardziej rozpowszechnionymi są: podejście niemieckie i amerykańskie. Pierwsze z nich ogranicza treść pojęcia ryzyka do negatywnego skutku w wyniku podjętej decyzji, czyli traktuje ryzyko jako „niebezpieczeństwo niezrealizowania celu założonego przy podejmowaniu określonej decyzji” [76]. Nieosiągnięcie celu może się wyrazić zarówno wystąpieniem straty, jak i niższym od założonego wyniku. Z kolei w podejściu amerykańskim ryzyko traktuje się nie tylko w kategorii możliwości poniesienia straty, ale również osiągnięcia zysku [81, 150].

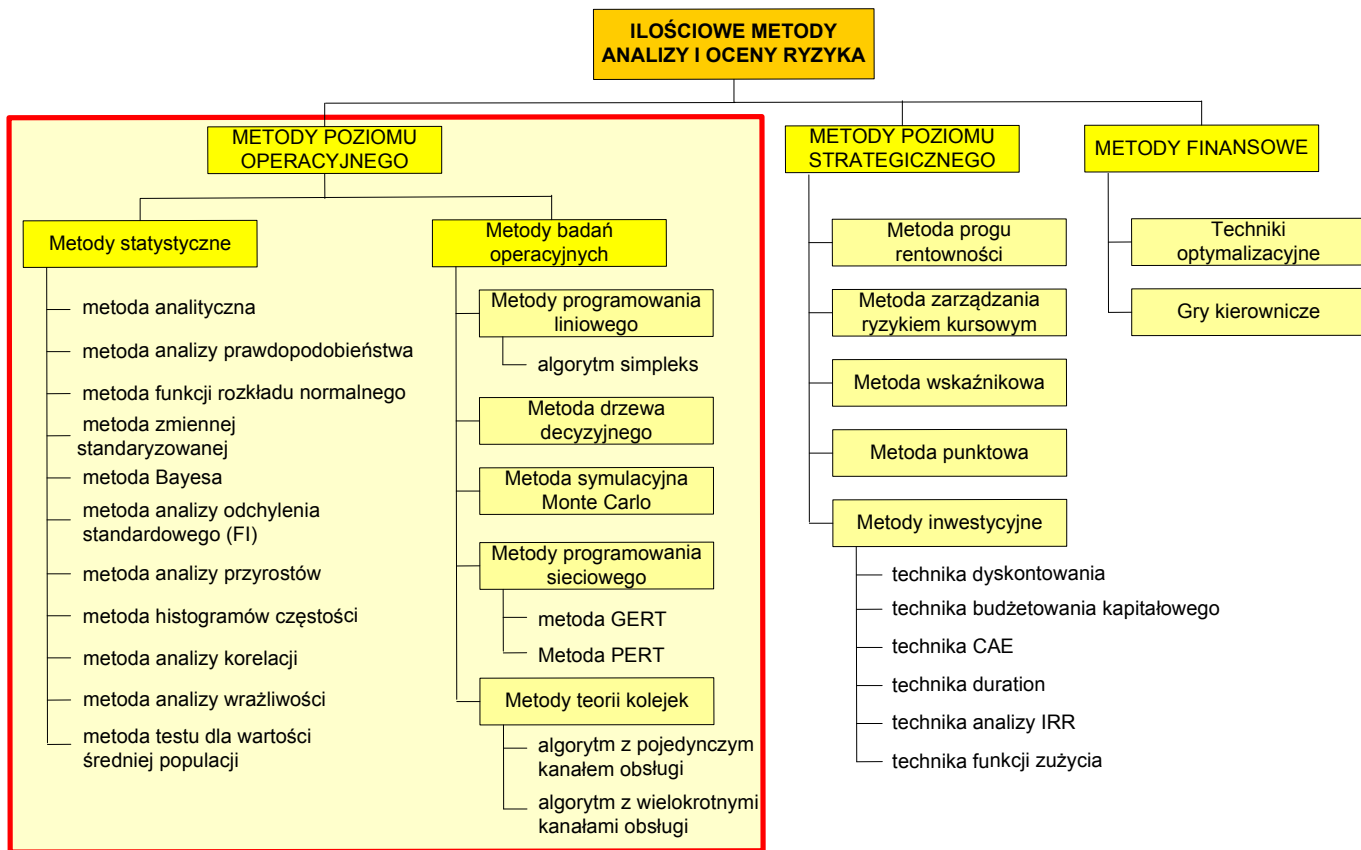
Ponieważ systemy produkcyjne mają charakter techniczny, właściwe w ocenie ryzyka produkcyjnego jest podejście niemieckie. Oczekiwane rezultaty produkcyjne nie mogą być większe niż pozwalają na to np. ograniczenia związane z technologią lub organizacją procesu produkcyjnego. Powoduje to, że wiele metod analizy i oceny ryzyka już na poziomie taktowania ryzyka w sposób jedno- lub dwubiegunowy, nie może być wykorzystane w ocenie ryzyka systemów produkcyjnych. Różnice w amerykańskim i niemieckim podejściu do definicji ryzyka przedstawiona na rysunku 57.



Rys. 57. Koncepcja ryzyka; podejście amerykańskie i niemieckie [35, 36, 41]

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.

Autorzy publikacji różnie klasyfikują i nazywają poszczególne metody oceny i analizy ryzyka [21, 150, 160, 216]), jednak najczęściej w literaturze wymieniane są dwie klasy metod:



Rys. 58. Ilościowe metody analizy i oceny ryzyka [35, 39, 41]

1. Klasa metod werbalnych, nazywanych również opisowymi lub ogólnymi, umożliwiającą poznanie natury występującego ryzyka w organizacji.

2. Klasa metod mierzalnych, nazywanych również ilościowymi, umożliwiającą oszacowanie wielkości ryzyka i wykorzystująca dane liczbowe.

Do wymienionych klas zalicza się poszczególne grupy metod analizy i oceny ryzyka. Również tutaj literatura różnie kwalifikuje poszczególne grupy metod do klas.

Ponieważ zarządzanie procesem produkcyjnym ma charakter operacyjny, a sterowanie nim wymaga wykorzystywania szczegółowych danych liczbowych na temat jego przebiegu, w ocenie ryzyka systemów produkcyjnych mogą być brane pod uwagę jedynie metody ilościowe poziomu operacyjnego. Na rysunku 58 przedstawiono wszystkie grupy metod ilościowych, ze szczegółowym uwzględnieniem metod poziomu operacyjnego.

Tabela 13. Porównanie metod ilościowych analizy i oceny ryzyka według wybranych kryteriów [33, 35, 39, 41]

Metoda	Znajomość rozkładu	Liczba danych wejściowych	Sekwencyjność	Czy metoda graficzna?	Złożoność
Metody statystyczne					
Analizyczna	○	○	○	●	○
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					
Aalgorytm simpleks	○	●	●	●	●
Drzewa decyzyjnego	○	●	●	●	○
Monte Carlo	●	●	●	○	●
GERT	●	●	●	●	●
PERT	●	●	●	●	●
Teorii kolejek	○	○	○	○	●
Legenda					
● – dużo/tak		● – średnio/trochę		○ – mało/nie	

Proponowane przez literaturę metody ilościowe odnoszą się do pojedynczych zagadnień, zakładając wystąpienie odpowiednich czynników i warunków oraz narzucają 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 przedsiębiorstw, podejście to jest niewłaściwe. W tabeli 13 przedstawiono porównanie najczęściej spotykanych w literaturze metod ilościowych analizy i oceny ryzyka. Kryteria porównawcze wybrano tak, aby pokazać ich przydatność w rozwiązywaniu problemów praktycznych.

Analizując porównanie przedstawione w tabeli 13 konieczne jest dostosowanie tych metod do aktualnego poziomu rozwoju techniki i technologii procesów produkcyjnych. Dlatego w kolejnych podrozdziałach 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3 proponuje się własne metody analizy i oceny ryzyka systemów produkcyjnych. W budowie tych metod wykorzystano właściwości struktur niezawodnościowych systemów, co ułatwiło dowolną dekompozycję systemu produkcyjnego i wyznaczenie obszarów, w których ryzyko jest największe.

4.2. OCENA RYZYKA PROCESÓW PRODUKCYJNYCH ZA POMOCĄ ANALIZY FMEA

Analiza przyczyn i skutków wad FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*) to metoda należąca do grupy metod kontroli jakości. W zależności od typu metoda ta umożliwia wyznaczenie obszaru w procesie, w którym występuje największe ryzyko – FMEA procesu (ang. process FMEA, PFMEA) lub najbardziej wadliwego elementu w konstrukcji wyrobu – FMEA projektu (ang. *design* FMEA, DFMEA). Wykorzystywana jest tutaj wiedza i doświadczenie pracowników, dzięki czemu dodatkowo proponowane są rozwiązania minimalizujące poziom ryzyka. Celem FMEA procesu jest m.in. [98, 208]:

- identyfikacja słabych punktów i zmiennych procesu, na których należy skupić kontrolę,
- zastosowanie środków zapobiegających występowaniu słabych miejsc w procesach,
- opracowanie listy potencjalnych zagrożeń, uszeregowanych według ich wpływu na klienta,
- usprawnienie procesów niestabilnych i zapewnienie jego prawidłowego przebiegu.

Aby przeprowadzić analizę FMEA, należy opracować specjalny formularz, w którym zostaną wpisane dane dotyczące analizowanych wyrobów lub procesów oraz potencjalne wady, potencjalne skutki wad, prawdopodobieństwo wystąpienia (P), stopień zagrożenia (Z), wykrywalność (Tr), liczbę priorytetów ryzyka (RPN, ang. *Risk*

Priority Number) oraz działania naprawcze. Kolejnym krokiem w analizie jest nadanie wartości liczbowych następującym parametrom przedstawionym w tabeli 14.

Tabela 14. Charakterystyka parametrów wykorzystywanych w metodzie FMEA [27]

Symbol parametru	Nazwa parametru	Opis
<i>Z</i>	stopień zagrożenia	Określa wielkość skutków, jakie powstają w wyniku pojawienia się wady podczas procesu produkcyjnego oraz eksploatacji produktu.
<i>P</i>	prawdopodobieństwo	Prawdopodobieństwo wystąpienia wady.
<i>Tr</i>	wykrywalność	Określa prawdopodobieństwo, że potencjalna wada lub jej przyczyna ujawni się w późniejszym czasie.

Poszczególnym parametrom *Z*, *P* i *Tr* nadawane są wartości liczbowe, zgodnie z intuicją i stanem wiedzy osoby biorącej udział w metodzie. Skalę wartości parametrów *Z*, *P* i *Tr* przedstawia rysunek 59.

Wskaźnik		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stopień zagrożenia	Z	Szacowane ryzyko									
Prawdopodobieństwo	P	Szacowane ryzyko									
Wykrywalność	Tr	Szacowane ryzyko									

Rys. 59. Skala parametrów a wielkość ryzyka

Następnie wyznaczana jest wartość ryzyka dla analizowanego obszaru według wzoru:

$$RPN = Z P Tr \quad (10)$$

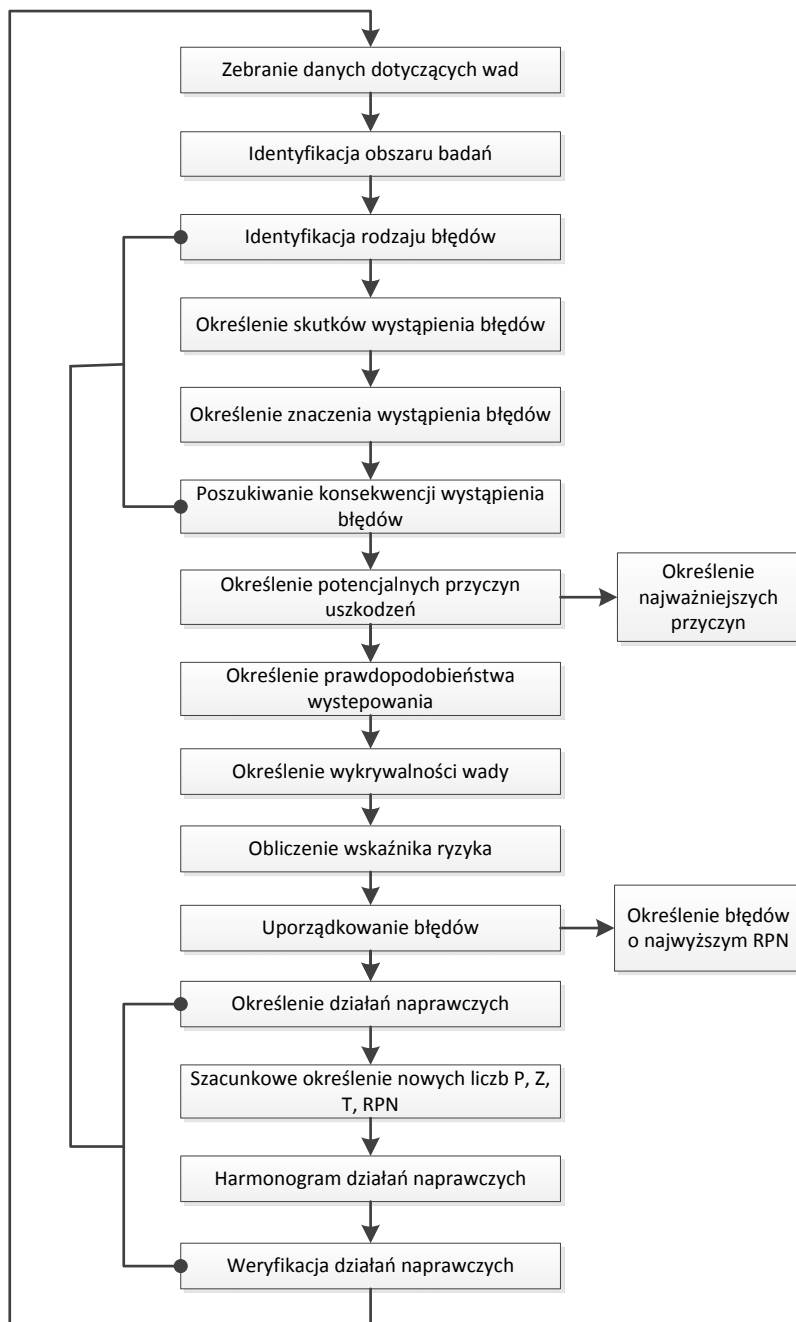
Obliczenie *RPN* pozwala zyskać pogląd na wielkość ryzyka oraz służy za punkt odniesienia dla kolejnych środków, które zostaną podjęte w celu jego minimalizacji. Wartość *RPN* mieści się pomiędzy 1 a 1000. W przypadku podwyższonej wartości *RPN* zespół musi podjąć starania w celu redukcji ryzyka, za pomocą działań korekcyjnych. Duża wartość *RPN* jest zatem odpowiednikiem ogromnego ryzyka w procesie. Wszystkie możliwe wady powinny zostać uporządkowane zgodnie ze wzrastającą wartością wskaźnika *RPN*, a następnie z taką kolejnością następuje usuwanie błędów. Ostatni etap w metodzie FMEA to przeprowadzenie działań korekcyjnych w obszarze wystąpienia największego *RPN*. Wyniki optymalizacji nanoszone są na formularz, którego przykład dla stanu obecnego etapu rozruchu przenośnika taśmowego przedstawiono w tabeli 15. Szczegółowe etapy postępowania w metodzie FMEA przedstawiono na rysunku 60.

Tabela 15. Fragment formularza FMEA dla stanu obecnego etapu rozruchu przenośnika taśmowego [27]

Etap procesu	Możliwe błędy	Skutki, które wywołują błędy	Możliwe przyczyny błędów	Stan obecny			
				Prawdop. wystąpienia (P) [pkt]	Znaczenie skutku (Z) [pkt]	Wykrywalność (Tr) [pkt]	Ryzyko (RPN) [pkt]
Rozruch przenośnika taśmowego	Uszkodzenie układu napędowego	Awaria przekładni zębatej	Wyłamanie/wykruszenie zęba, za duże przeciążenia przekładni zębatej, nieszczelność	5	8	2	80
		Awaria sprzęgła	Rozruch pod obciążeniem, zużycie eksploatacyjne elementów	5	8	3	120
		Awaria silnika	Rozruch pod obciążeniem, uszkodzenie łożyska, zużycie eksploatacyjne elementów, ukłucie wału, zły stan przewodów elektrycznych	6	7	3	126
		Awaria bębna	Uszkodzenia łożysk tocznych, nierównomierne obciążenie bębnow w czasie rozruchu, uszkodzenie płaszcza	6	6	5	180
	Uszkodzenie taśmy	Zerwanie taśmy	Rozruch pod obciążeniem, uszkodzenia powierzchni taśmy – wydarcia/wybiecia/pęknięcia/wydarcia linki stalowej	5	9	2	90
		Zsuwanie się taśmy	Zużycie eksploatacyjne krążników górnych i dolnych	5	9	7	315

Po wdrożeniu działań naprawczych zaleca się przeprowadzenie kontrolnej analizy FMEA. Taką analizę przeprowadza się w celu sprawdzenia czy efekty działań naprawczych oraz założone cele pokrywają się z rzeczywistym obszarem.

Dzięki metodzie FMEA można zidentyfikować czynniki ryzyka, ocenić wielkość ich wpływu na system produkcyjny i wyznaczyć obszar o największym poziomie ryzyka. Ze względu na łatwość stosowania jest coraz powszechniejsza w zespołach pracowniczych, służąc poprawie jakości produktów i procesów. Niestety wielkość ryzyka wyrażona przez *RPN* wyznaczana jest na podstawie wskaźników, których wartości szacuje się w sposób intuicyjny na podstawie wiedzy i doświadczenia osób biorących udział w metodzie. Nie ma gwarancji, że wybierając innych pracowników do analizy i oceny ryzyka procesu nie uzyska się zupełnie innych wyników. Daje jednak podstawę do prowadzenia dalszej analizy ryzyka.



Rys. 60. Etapy prowadzenia analizy ryzyka zgodnie z metodą FMEA [209]

4.3. NIEZAWODNOŚĆ W OCENIE RYZYKA SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Funkcjonowanie systemu zależy od funkcji jego części składowych i związków między nimi. Powiązania części składowych określają strukturę systemu. Części składowe nazywane są często komponentami, elementami, obiektami, podsystemami lub członami [23]. 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)” [143]. Przeniesienie na grunt systemów produkcyjnych teorii niezawodności mogłoby przynieść wiele korzyści w planowaniu i ocenie ryzyka systemów produkcyjnych, jednak wymaga zdefiniowania określonego podejścia do procesu produkcyjnego.

Termin niezawodność ma wiele interpretacji. Jednak najczęściej spotykana w literaturze definicja niezawodności obiektów [21, 116, 153, 168, 169] 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 przez wybór odpowiednich wskaźników oraz wartościowe określenie ich wielkości. Powinien być również dostosowany do celu analizy niezawodności obiektu.

Sama teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1, to jest działania lub też jego braku [116, 143]. Takie podejście odnosi się do obiektów technicznych, jednak nie nadaje się do opisu obiektów biotechnicznych czy też systemów eksploatacyjnych, a więc i systemów produkcyjnych. Tutaj zastosowanie znajduje tzw. „ogólna teoria niezawodności”, której zasady i definicje można znaleźć m.in. w pracach [21, 117, 144].

Specyfika dzisiejszych systemów produkcyjnych, a w szczególności ich złożoność, umożliwia je traktować jako systemy eksploatacyjne i wówczas niezawodność jest jedną z ich cech mierzoną przez stopień realizacji wyznaczonych wskaźników, parametrów i charakterystyk [21, 143]. Z drugiej strony, systemy produkcyjne muszą funkcjonować w otoczeniu, które w sposób ciągły oddziałuje na system i powoduje jego zakłócenia.

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 czas produkcji określonej liczby elementów, wydajność oraz produktywność [80, 118, 123, 135].

Zagadnienia niezawodności odnoszą się do problemów związanych z funkcjonowaniem obiektów technicznych. Termin ten bardzo rzadko odnosi się do systemów gospodarczych lub ekonomicznych. Ponieważ w myśl teorii systemów system może odnosić się zarówno do obiektów technicznych, jak i ekonomicznych lub gospodarczych, to zasadne jest przeniesienie na grunt zarządzania systemami produkcyjnymi ogólnej teorii niezawodności oraz zastosowanie jej w planowaniu i ocenie ryzyka. W systemach produkcyjnych 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 przez potraktowanie zawodności Z jako synonimu ryzyka R [21]:

$$R = Z \quad (11)$$

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 w nim strat. Dla takiej interpretacji powinno być prawdziwe równanie [21]:

$$N + Z = 1 \quad (12)$$

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

$$R + Z = 1 \quad (13)$$

a stąd

$$R = 1 - N \quad (14)$$

Analiza i ocena ryzyka umożliwia więc określenie niezawodności funkcjonowania systemu i odwrotnie. Podejście niezawodnościowe w planowaniu i ocenie ryzyka daje więcej możliwości i ułatwia lokalizację czynników ryzyka w systemie produkcyjnym.

4.4. STRUKTURA NIEZAWODNOŚCIOWA SYSTEMÓW

Na zawodność (ryzyko) lub na niezawodność systemu wpływa również jego struktura. Analizując system najważniejsze jest określenie powiązań (relacji) między jego elementami. Relacje te będą definiować sposób funkcjonowania i strukturę systemu i mogą mieć charakter materialny, energetyczny, informacyjny lub czasowy.

Sprzężenia mogą być jedno- lub wieloparametrowe. Różne relacje między elementami mogą tworzyć różne struktury. O rodzaju struktury decydują przede wszystkim [152]:

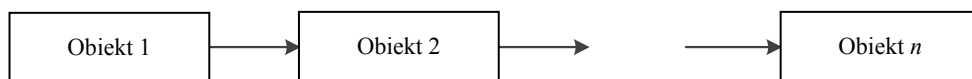
- liczba elementów,
- liczba powiązań między elementami,
- stopień zróżnicowania elementów,
- rodzaje powiązań.

W zależności od sprzężeń występujących między obiektami w systemach, w tym również produkcyjnych, można wyróżnić ich różne rodzaje struktur. 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, odzwierciedlającą powiązania logiczne w systemie tak, aby poszczególne jego części były niezależne statystycznie i możliwie jak największe. W zależności od rodzaju sprzężenia między obiektami w systemie najczęściej spotykanymi strukturami niezawodnościowymi są struktury [116, 168, 210]:

- szeregowe,
- równoległe,
- szeregowo-równoległe.

4.4.1. METODA WYZNACZANIA WIELKOŚCI RYZYKA DLA SYSTEMÓW O STRUKTURZE SZEREGOWEJ

System ma **strukturę szeregową**, jeśli wymagany jest do jego działania rozruch 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 [143]. W strukturze szeregowej 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. Na rysunku 61 przedstawiono przykład struktury niezawodnościowej szeregowej dla n obszarów.



Rys. 61. Przykład struktury szeregowej systemu o n obszarach

Struktura szeregową jest najczęstszym rodzajem struktury w systemach i procesach produkcyjnych [214]. Na przykład uszkodzenie jednej maszyny w procesie wy-

twórczym powoduje nieprawidłowe funkcjonowanie lub jego brak całego systemu produkcyjnego.

Przy tego typu układach niezawodność systemu jest jego iloczyn obiektów, stąd wraz ze wzrostem liczby obiektów w systemie jego niezawodność maleje. Niezawodność systemu (N_S) o strukturze szeregowej będzie określana wzorem [143]:

$$N_S = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_n \quad (15)$$

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

Korzystając ze wzorów (14) i (15), ryzyko całkowite (R_C) tego systemu wynosi:

$$R_C = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)] \quad (16)$$

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

Dla poszczególnych obszarów wielkości ryzyka R_i oblicza się w następujący sposób [31, 33, 40, 41]:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{\text{teoret}}} \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{\text{teoret}} - S_1} \quad (18)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{\text{teoret}} - S_1 - \dots - S_{n-1}} \quad (19)$$

gdzie S_i – oznacza stratę w i -tym obszarze spowodowaną występowaniem czynników ryzyka r_i , W_{teoret} – oznacza analizowany wskaźnik (np. wydajność, produktywność, itd.) teoretycznie możliwy do uzyskania przez system produkcyjny.

Straty S_i w poszczególnych obszarach zależą od strat czasów powodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego ze względu na występujące w nich 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 [33, 35, 41]:

$$S_1 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (20)$$

$$S_2 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (21)$$

$$S_n = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (22)$$

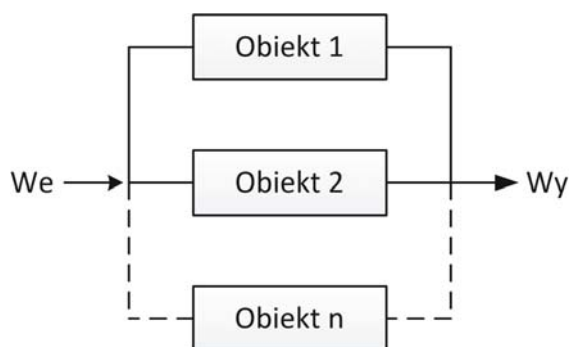
gdzie: Δt_i – straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka, T – oznacza jednostkę czasu lub okres, dla którego wyznaczone osiągnięcie celu przez system produkcyjny jest okresem reprezentatywnym.

Ryzyko całkowite R_c dla systemu o n obszarach i strukturze szeregowej wynosi zatem:

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} \right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1} \right) \dots \left(1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 - \dots - \Delta t_{n-1}} \right) \right] \quad (23)$$

4.4.2. METODA WYZNACZANIA WIELKOŚCI RYZYKA DLA SYSTEMÓW O STRUKTURZE RÓWNOLEGŁEJ

Według teorii klasycznej niezawodność charakteryzuje się tym, że system jest w stanie zdatności, jeżeli co najmniej jeden z jego obiektów jest w nim [143], co oznacza, że do poprawnego funkcjonowania systemu wystarczy poprawne funkcjonowanie jednego jego elementu. Niezawodność takiego układu wzrasta po zwiększaniu liczby obiektów równoległe sprzężonych. Przykładowy schemat niezawodnościowej struktury równoległej systemu o n obiektach przedstawiono na rysunku 62.



Rys. 62. Przykład równoległej struktury niezawodnościowej systemu o n obszarach

Niezawodność systemu N_s , przedstawionego na rysunku 62, będzie określana wzorem [143]:

$$N_s = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2) \dots (1 - N_n)] \quad (24)$$

gdzie N_1, N_2, \dots, N_n – niezawodność poszczególnych obiektów/podsystemów systemu.

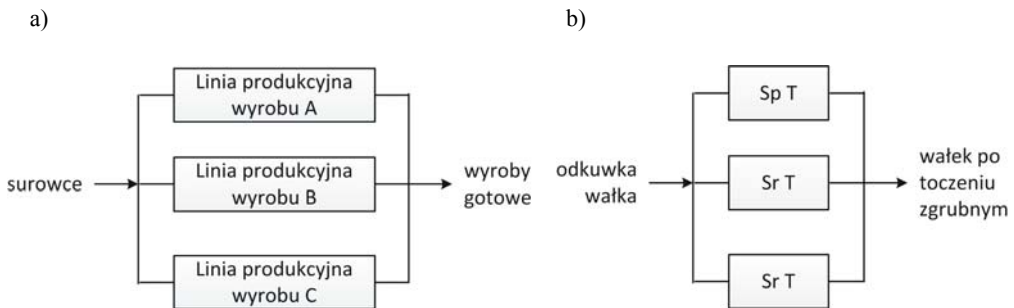
Ryzyko całkowite R_c systemu można wyznaczyć na podstawie wzorów (14) oraz (24):

$$R_c = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (25)$$

gdzie R_1, R_2, \dots, R_n – ryzyko występujące w poszczególnych obszarach/elementach systemu.

W praktyce produkcyjnej występują struktury równoległe, jednak charakter procesu produkcyjnego nie ułatwia takiej interpretacji 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 [143], czyli z nadmiarem elementów funkcjonujących w systemie. W rzeczywistości systemy z rezerwą występują bardzo rzadko, gdyż nadmiar elementów (np. maszyn, pracowników, środków transportu itd.) oznacza niewykorzystane zasoby, co pociąga za sobą zwiększenie kosztów.

Znacznie właściwsze jest opracowanie metody wyznaczania ryzyka dla produkcyjnych struktur równoległych. Przykład takiej struktury pokazano na rysunku 63a, natomiast przykład struktury równoległej z nadmiarami pokazano na rysunku 63b.



Rys. 63. a) przykład produkcyjnej struktury równoległej, b) przykład równoległej struktury niezawodnościowej z nadmiarami: Sp T – stanowisko pracujące tokarka, Sr T – stanowisko rezerwowe tokarka [32, 36, 41]

Traktując strukturę systemu z rysunku 63 za produkcyjną strukturą równoległą, wzór na ryzyko dla tego systemu powinien przedstawiać się następująco:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (26)$$

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

Przyjmując te same oznaczenia co wcześniej, poszczególne ryzyka R_i dla n obszarów, w zależności od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, wynoszą [32, 36, 41]:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{\text{teoret}}} \quad (27)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{\text{teoret}}} \quad (28)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{\text{teoret}}} \quad (29)$$

W przypadku gdy wyróżnione obszary różnią się między sobą, zachodzi konieczność przy tego typu strukturze wyznaczenia wartości teoretycznej analizowanego wskaźnika (W_{teoret}) dla każdego z obszarów. Wyznaczając wartości W_{teoret} dla każdego z wyróżnionych n obszarów, poszczególne straty S_i w nich, zależnie od strat czasów powodowanych występowaniem czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, wynoszą [32, 36, 41]:

$$S_1 = W_{\text{teoret}}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (30)$$

$$S_2 = W_{\text{teoret}}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (31)$$

$$S_n = W_{\text{teoret}}^n \frac{\Delta t_n}{T} \quad (32)$$

gdzie: W_{teoret}^i – oznacza wartość teoretyczną wskaźnika w poszczególnych obszarach systemu, Δt_i – straty czasu w poszczególnych obszarach spowodowane czynnikami ryzyka.

Ryzyko całkowite R_c dla systemu o n obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej wynosi:

$$R_c = \frac{W_{\text{teoret}}^1 \Delta t_1 + W_{\text{teoret}}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{\text{teoret}}^n \Delta t_n}{W_{\text{teoret}} T} \quad (33)$$

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

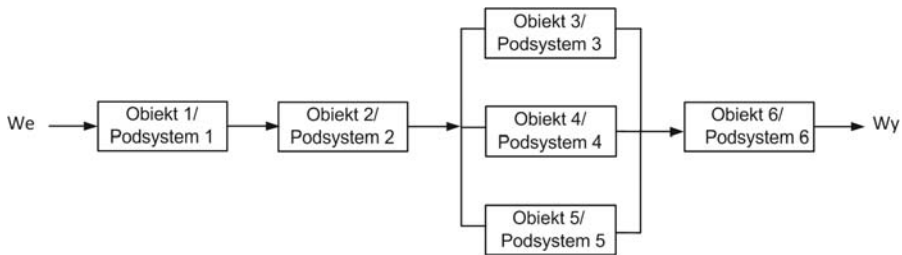
$$W_{\text{teoret}}^1 = W_{\text{teoret}}^2 = \dots = W_{\text{teoret}}^n = \frac{W_{\text{teoret}}}{n} \quad (34)$$

wówczas wzór na ryzyko całkowite takiego układu przyjmie postać [32, 36, 41]:

$$R_c = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (35)$$

4.4.3. METODA WYZNACZANIA WIELKOŚCI RYZYKA DLA SYSTEMÓW O PRODUKCYJNEJ STRUKTURZE SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEJ

Produkcyjna struktura szeregowo-równoległa stanowi mieszaninę struktury szeregowej i produkcyjnej równoległej. Przykładowy schemat systemu o tej strukturze, z sześcioma obiektami/podsystemami, został pokazany na rysunku 64.



Rys. 64. Przykładowy schemat układu szeregowo-równoległego

Wzór na ryzyko dla tego typu struktury, zgodnie ze wzorami (16) i (26), przyjmuje postać:

$$R_c = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - (R_3 + R_4 + R_5))(1 - R_6)] \quad (36)$$

Przy tych samych oznaczeniach ryzyko R_i dla sześciu obszarów takiego systemu, zależnie od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, wynosi [32, 36, 41]:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{\text{teoret}}} \quad (37)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{\text{teoret}} - S_1} \quad (38)$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2} \quad (39)$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2} \quad (40)$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2} \quad (41)$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5} \quad (42)$$

Ponieważ obszary O_2, O_4, O_5 tworzą produkcyjną strukturę równoległą, to istnieje konieczność wyznaczenia wartości teoretycznej analizowanego wskaźnika dla każdego z obszarów (W_{teoret}^i). Wyznaczając wartości $W_{\text{teoret}}^3, W_{\text{teoret}}^4, W_{\text{teoret}}^5$ dla każdego z tych obszarów; poszczególne straty S_i , uzależnione od strat czasów powodowanych występowaniem czynnika ryzyka, wynoszą [32, 36, 41]:

$$S_1 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (43)$$

$$S_2 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (44)$$

$$S_3 = W_{\text{teoret}}^3 \frac{\Delta t_3}{T} \quad (45)$$

$$S_4 = W_{\text{teoret}}^4 \frac{\Delta t_4}{T} \quad (46)$$

$$S_5 = W_{\text{teoret}}^5 \frac{\Delta t_5}{T} \quad (47)$$

$$S_6 = W_{\text{teoret}}^6 \frac{\Delta t_6}{T} \quad (48)$$

Ryzyko całkowite R_c zatem dla systemu o sześciu obszarach i produkcyjnej strukturze szeregowo-równoległej wynosi:

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} \right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1} \right) \left(1 - \frac{W_{\text{teoret}}^3 \Delta t_3 + W_{\text{teoret}}^4 \Delta t_4 + W_{\text{teoret}}^5 \Delta t_5}{W_{\text{teoret}} (T - \Delta t_1 - \Delta t_2)} \right) \right. \\ \left. \frac{W_{\text{teoret}} \Delta t_6}{W_{\text{teoret}} (T - \Delta t_1 - \Delta t_2) - W_{\text{teoret}}^3 \Delta t_3 - W_{\text{teoret}}^4 \Delta t_4 - W_{\text{teoret}}^5 \Delta t_5} \right] \quad (49)$$

4.4.4. UWZGLĘDNIENIE WSPÓŁCZYNNIKA WAGOWEGO I AKCEPTOWALNOŚCI RYZYKA

Opisane metody wyznaczania ryzyka dla różnych typów systemów produkcyjnych mogą posłużyć do wyznaczenia jego wielkości 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. Rzeczywisty wówczas wpływ opóźnień na system produkcyjny jest mniejszy, niż wynika to z zarejestrowanych czasów dostaw. Dlatego proponuje się zastosowanie w metodzie współczynników wagowych, których konstrukcja umożliwi określenie rzeczywistego poziomu ryzyka w systemie.

Za pomocą 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 [35, 41]:

$$w_i = \frac{\Delta t_i^r}{\Delta t_i} \quad (50)$$

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 wzory na ryzyko całkowite R_c dla różnych typów struktur niezawodnościowych będą następujące:

- dla systemu o n obszarach i strukturze szeregowej

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1 \right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2 \right) \dots \left(1 - \frac{\Delta t_n}{T - \Delta t_1 w_1 - \dots - \Delta t_{n-1} w_{n-1}} w_n \right) \right] \quad (51)$$

- dla systemu o n obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej

$$R_c = \frac{W_{\text{teoret}}^1 \Delta t_1 w_1 + W_{\text{teoret}}^2 \Delta t_2 w_2 + \dots + W_{\text{teoret}}^n \Delta t_n w_n}{W_{\text{teoret}} T} \quad (52)$$

- dla systemu o sześciu obszarach i produkcyjnej strukturze szeregowo-równoległej

$$R_c = 1 - \left[\left(1 - \frac{\Delta t_1}{T} w_1 \right) \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T - \Delta t_1 w_1} w_2 \right) \right. \\ \times \left(1 - \frac{W_{\text{teoret}}^3 \Delta t_3 w_3 + W_{\text{teoret}}^4 \Delta t_4 w_4 + W_{\text{teoret}}^5 \Delta t_5 w_5}{W_{\text{teoret}} (T - \Delta t_1 w_1 - \Delta t_2 w_2)} \right) \\ \left. \times \left(\frac{W_{\text{teoret}} \Delta t_6}{W_{\text{teoret}} (T - \Delta t_1 w_1 - \Delta t_2 w_2) W_{\text{teoret}}^3 \Delta t_3 w_3 - W_{\text{teoret}}^4 \Delta t_4 w_4 - W_{\text{teoret}}^5 \Delta t_5 w_5} w_6 \right) \right] \quad (53)$$

W danych warunkach organizacyjnych, technicznych i technologicznych wielkość ryzyka danego systemu jest stała. W przypadku gdy w jednym z obszarów/podsystemów systemu poziom ryzyka jest zbyt duży (nieakceptowalny), można go obniżyć. Wówczas jednak zmianie ulegną pozostałe poziomy ryzyka w innych obszarach/podsystemach. Zmiana poziomu ryzyka w poszczególnych obszarach/podsystemach systemu produkcyjnego do poziomu akceptowalnego może odbywać się proporcjonalnie.

Stosując proporcjonalny współczynnik akceptowalności ryzyka, w pierwszej kolejności należy ustalić poziom ryzyka, który będzie akceptowalny w danym obszarze/podsystemie ($R_{i\text{akcept}}$), gdzie:

$$R_i > R_{i\text{akcept}} \quad (54)$$

Proporcjonalny współczynnik ryzyka akceptowalnego będzie wyznaczany następująco [32]:

$$WP = PR_{\text{akcept}} \frac{1}{n-1} \quad (55)$$

gdzie: WP – proporcjonalny współczynnik akceptowalności ryzyka, PR_{akcept} , n – liczba obszarów lub podsystemów w systemie produkcyjnym.

Po uwzględnieniu proporcjonalnego współczynnika wagowego ryzyka w poszczególnych obszarach/podsystemach systemu będą następujące:

- dla systemu o szeregowej strukturze niezawodnościowej

$$R_n = \frac{S_n}{W_{\text{teoret}} - S_1 - \dots - S_{n-1}} \quad (56)$$

- dla systemu o produkcyjnej strukturze równoległej

$$R_n = WP \frac{S_n}{W_{\text{teoret}}} \quad (57)$$

Przykład 7

Zapewnienie stabilności reorganizowanego systemu produkcyjnego wiązek elektrycznych przez ocenę ryzyka

Za przykład prezentacji możliwości zapewnienia stabilności systemu produkcyjnego przez analizę i ocenę ryzyka posłuży system produkcyjny przedsiębiorstwa wytwarzającego wiązki elektryczne do zmywarek Electrolux. Przedsiębiorstwo to zostało opisane w przykładzie 5 w rozdziale 3, gdzie przedstawiono możliwość zastosowania modelowania i symulacji komputerowej w reorganizacji linii produkcyjnej. Obecnie przedstawione zostanie wykorzystanie opisanych w punktach 4.4.1 do 4.4.3 metod analizy i oceny ryzyka do zapewnienia stabilności tej zreorganizowanej linii produkcyjnej.

Na potrzeby metod zbudowane zostaną modele symulacyjne, które umożliwiają wyznaczenie przyrostów czasu spowodowane występowaniem czynników ryzyka. Wyznaczenie jego poziomu i wpływu na analizowany system produkcyjny ułatwi oszacować, w jakim stopniu system jest stabilny, czyli zdolny do realizacji założonego planu produkcji oraz które czynniki ryzyka w największym stopniu destabilizują jego funkcjonowanie.

Wyznaczenie celu systemu i okresu analizy oraz identyfikacja czynników ryzyka

Aby rozpocząć analizę i ocenę ryzyka w pierwszej kolejności należało wyznaczyć cel systemu produkcyjnego, który należy określić za pomocą wartości wybranego wskaźnika (W). Za cel systemu produkcyjnego przyjęto produkcję 1260 szt. wiązek elektrycznych na zmianę produkcyjną. Za margines dopuszczalnego błędu w ilości wyprodukowanych elementów, przy którym system produkcyjny pozostanie stabilny, przyjęto 10%.

Ponieważ jednak czynniki ryzyka pojawiają się w systemie produkcyjnym w sposób losowy, to do analizy należało przyjąć okres reprezentatywny (T). Uznano, że okres ten powinien wynosić 3 miesiące, gdyż jest to czas, który umożliwia zebranie pełnych charakterystyk czynników ryzyka. Zakład pracuje w trybie dwuzmianowym, co dla przyjętego okresu reprezentatywnego daje 120 zmian produkcyjnych. Dla tak przyjętych założeń cel systemu produkcyjnego wynosi: $W = 1260 \text{ szt./zmianę roboczą} \cdot 120 \text{ zmian roboczych} = 151200 \text{ szt./12 tyg.} \pm 10\%$.

Wszystkie czynniki ryzyka wyodrębniono i zebrano ich charakterystyki. W tym celu posłużono się obserwacjami, analizą dokumentacji zrealizowanych wcześniej zleceń produkcyjnych, pomiarami czasów technologicznych oraz konsultacjami i wywiadami z pracownikami różnych szczebli organizacyjnych. Zebrane w ten sposób dane przedstawiono w tabeli 16.

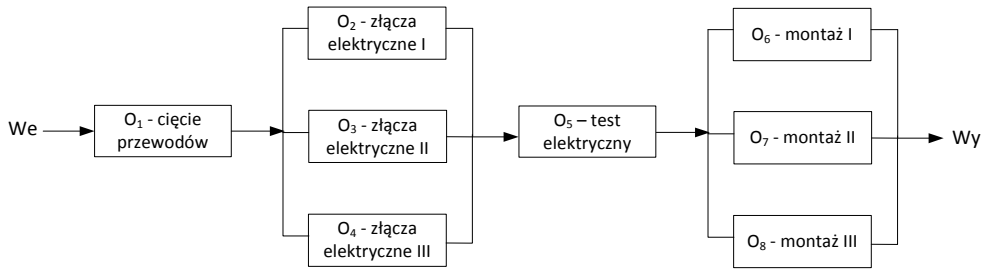
Tabela 16. Zidentyfikowane czynniki ryzyka i ich charakterystyki

Nazwa czynnika ryzyka	Przyjęte oznaczenie	Charakterystyka wpływu na system produkcyjny
Ryzyko nieobecności pracowników	r_1	Spowodowane absencją wynikającą z nie planowanych urlopów, które wynoszą 10% dni roboczych rocznie na jednego pracownika. Wynikające ze zwolnień chorobowych, co przekłada się rocznie na 5–7% czasu pracy na 1 pracownika.
Ryzyko rotacji pracowników	r_2	Rotacja dotyczy 33% pracowników produkcyjnych rocznie. Negatywny wpływ rotacji na system produkcyjny wynika z konieczności przeszkolenia i zdobycia doświadczenia przez nowego pracownika. W przypadku pracowników montażu, spadek wydajności wynosi ok. 50% i dopiero po okresie 1 miesiąca pracy pracownik osiąga zakładaną wydajność. W przypadku pozostałych gniazd roboczych spadek wydajności wynosi 30% i trwa około 1 tygodnia.
Ryzyko błędów jakości	r_3	W ustabilizowanej pracy analizowanej linii oszacowano liczbę elementów do poprawy na poziomie 5 elementów/zmianę/stanowisko montażu. W przypadku wystąpienia rotacji pracowniczej liczbę elementów do poprawy oszacowano na 20 elementów/zmianę/stanowisko montażu, spadek jakości trwa przez ok. 2 tygodnie. W większości przypadków naprawa wadliwych elementów wykonywana jest na wydzielonych stanowiskach i nie wpływa znacząco na przebieg procesu produkcyjnego.
Ryzyko przestojów na linii produkcyjnej	r_4	Awarie maszyn, dla których średni czas unieruchomienia stanowiska w analizowanym okresie wahał się 0,4–1,5 godz. na tydzień. Nieplanowane przebrojenia, wynikające z konieczności realizacji zleceń o wyższym priorytecie; Otrzymano następujące dane na temat dodatkowych przebrojeń stanowisk roboczych: półautomaty do aplikacji przewodów w złącza elektryczne 8–6 min., w zależności od liczby przewodów w module.

We wszystkich wyodrębnionych obszarach analizowanego systemu produkcyjnego będą występować wszystkie 4 zaobserwowane czynniki ryzyka, jednak ich charakterystyki mogą być różne i będą zależeć od rodzaju gniazda produkcyjnego, którego pracę zakłócają.

*Struktura niezawodnościowa analizowanego systemu
i wyniki uzyskane z modeli symulacyjnych*

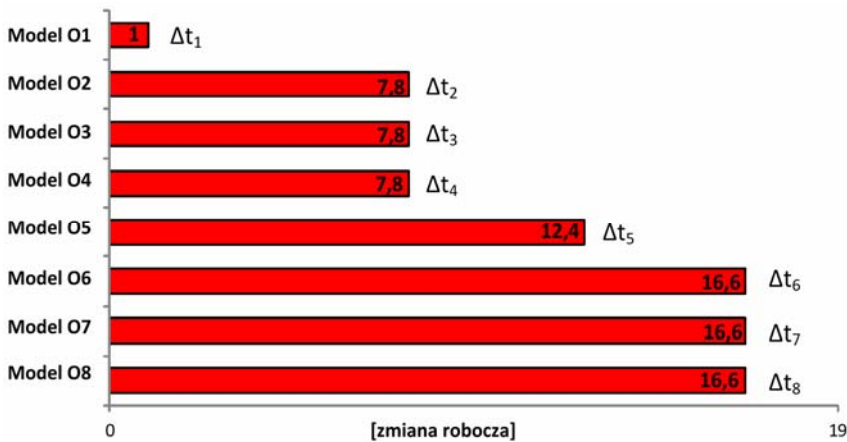
System produkcyjny wiązek elektrycznych ma szeregowo-równoległą strukturę niezawodnościową, co schematycznie przedstawiono na rysunku 65. Do budowy struktury wybrano jedynie gniazda produkcyjne, których obciążenia przekraczały 75% przy zwiększonym programie produkcji (por. rys. 47). Uznano, że w pozostałych przypadkach zakłócenia powodowane występowaniem czynników ryzyka, ze względu na ich małe obciążenia, nie wpływają na stabilność całego układu.



Rys. 65. Struktura niezawodnościowa analizowanego systemu wraz z przyjętymi oznaczeniami obszarów

Do wyznaczenia wpływu poszczególnych czynników ryzyka na system produkcyjny posłużył drugi model symulacyjny, który analizował wpływ na system produkcyjny zwiększonego o 40% programu produkcji. Sposób budowy tego modelu oraz uzyskane wyniki z eksperymentów na nim również opisano w przykładzie 5. Model ten nazwano modelem bazowym, gdyż jego wyniki stanowiły bazę do porównań z modelami zawierającymi czynniki ryzyka.

Ponieważ wszystkie opisane czynniki ryzyka występują w całym systemie produkcyjnym, różniąc się jedynie charakterystykami w poszczególnych obszarach, zdecydowano się na symulację wariantową. Kolejne modele budowano, wprowadzając do modelu bazowego charakterystykę czynników ryzyka występujących w kolejnych obszarach. Na tej podstawie wyznaczono przyrosty czasu powodowane występowaniem czynników ryzyka w każdym obszarze analizowanego systemu. Na rysunku 66 przedstawiono przyrosty czasu uzyskane w eksperymentach na modelach.



Rys. 66. Przyrosty czasu w modelach powodowane występowaniem czynników ryzyka w poszczególnych obszarach analizowanego systemu

Do wyznaczenia wielkości ryzyka dla całego systemu produkcyjnego korzystano ze wzoru (49), modyfikując go zgodnie z wyznaczoną strukturą niezawodnościową przedstawioną na rysunku 65. Ponieważ obszary O_2 , O_3 , O_4 i obszary O_6 , O_7 , O_8 tworzą produkcyjną strukturę równoległą, to zgodnie z przyjętą metodą wyznaczania wielkości ryzyka dla produkcyjnych struktur równoległych, należy wyznaczyć W_{teoret}^i dla każdego obszaru. Na analizowanej linii produkcyjnej wszystkie gniazda robocze, zarówno złączy elektrycznych I, II i III, jak i montażu I, II i III, są jednakowe. Gniazda te mają taką samą wydajność, a jak wynika z analiz przeprowadzonych na modelu symulacyjnym również ich obciążenie jest identyczne (por. przykład 5, rozdz. 3). W związku z tym przyjęto, że dla każdego z tych gniazd produkcyjnych W_{teoret}^i będzie wynosić 50 400 szt./12 tygodni.

Wówczas wielkości strat w poszczególnych obszarach będą wynosić odpowiednio:

$$S_1 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_1}{T} = 151200 \cdot \frac{1}{120} = 1260 \text{ szt./3 miesiące}$$

$$S_2 = S_3 = S_4 = W_{\text{teoret}}^i \frac{\Delta t_4}{T} = 50400 \cdot \frac{7,8}{120} = 3276 \text{ szt./3 miesiące}$$

$$S_5 = W_{\text{teoret}} \frac{\Delta t_5}{T} = 151200 \cdot \frac{12,4}{120} = 15624 \text{ szt./3 miesiące}$$

$$S_6 = S_7 = S_8 = W_{\text{teoret}}^i \frac{\Delta t_8}{T} = 50400 \cdot \frac{16,6}{120} = 6972 \text{ szt./3 miesiące}$$

Znając wielkości strat, można z kolei wyznaczyć wielkości ryzyka dla poszczególnych obszarów, korzystając z wzorów (37) do (42):

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{\text{teoret}}} = \frac{1260}{151200} = 0,0083$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{\text{teoret}} - S_1} = \frac{3276}{151200 - 1260} = 0,022$$

$$R_3 = \frac{S_3}{W_{\text{teoret}} - S_1} = \frac{3276}{151200 - 1260} = 0,022$$

$$R_4 = \frac{S_4}{W_{\text{teoret}} - S_1} = \frac{3276}{151200 - 1260} = 0,022$$

$$R_5 = \frac{S_5}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4} = \frac{15624}{151200 - 1260 - 3276 - 3276 - 3276} = 0,11$$

$$R_6 = \frac{S_6}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5}$$

$$= \frac{6927}{151200 - 1260 - 3276 - 3276 - 3276 - 15624} = 0,061$$

$$R_7 = \frac{S_7}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5}$$

$$= \frac{6927}{151200 - 1260 - 3276 - 3276 - 3276 - 15624} = 0,061$$

$$R_8 = \frac{S_8}{W_{\text{teoret}} - S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5}$$

$$= \frac{6927}{151200 - 1260 - 3276 - 3276 - 3276 - 15624} = 0,061$$

Mając wyznaczone wielkości ryzyka w poszczególnych obszarach systemu i korzystając ze wzoru (49), można wyznaczyć ryzyko całkowite R_C dla całego systemu.

$$R_C = 1 - [(1 - R_1)(1 - (R_2 + R_3 + R_4))(1 - R_5)(R_6 + R_7 + R_8)]$$

$$= 1 - [(1 - 0,0083)(1 - (0,022 + 0,022 + 0,022))(1 - 0,11)$$

$$\times (1 - (0,061 + 0,061 + 0,061))] = 0,326$$

Wielkość R_C dla całego systemu produkcyjnego wynosi 0,33. Oznacza to, że z prawdopodobieństwem 33% system produkcyjny nie osiągnie założonego do realizacji celu, czyli produkcji 1260 szt. wiązek elektrycznych na zmianę produkcyjną. Oznacza to, że nie można uznać analizowanego systemu za stabilny.

Ocena wpływu czynników ryzyka na stabilność analizowanego systemu produkcyjnego

W każdym systemie produkcyjnym występują czynniki ryzyka. Jeśli ich wpływ jest zbyt duży, mogą wytrącić system ze stanu równowagi, powodując utratę jego stabilności i niemożność realizacji założonych celów. Jednak czynniki ryzyka mają charakter losowy, co oznacza, iż jedynie w odpowiednio długim czasie (w tzw. okresie reprezentatywnym) istnieje pewność, że wystąpią. W krótkich okresach, takich jak np. 1 zmiana organizacyjna, nie ma pewności, które z czynników ryzyka wystąpią.

Dla analizowanego przedsiębiorstwa zidentyfikowano czynniki ryzyka, określono ich charakterystyki (tab. 16), wyznaczono przyrosty czasu spowodowane ich występowaniem (rys. 66) oraz policzono wielkości strat, jakie powodują swoim oddziaływaniem na system. Dodatkowo zbadano, że występująca w systemie wielkość ryzyka R_C jest zbyt duża, aby uznać go za stabilny.

Poniżej zostanie przedstawiona analiza stabilności opisywanego systemu produkcyjnego dla różnych wariantów występowania czynników ryzyka w trakcie jednej zmiany roboczej. Z uwagi na losowy charakter czynników ryzyka badania będą dotyczyć wystąpienia jednego czynnika ryzyka, dwóch, trzech i wszystkich czterech. Takie zestawienie da również odpowiedź na pytanie, przy jakich wariantach wystąpień czynników ryzyka system pozostanie stabilny, a przy jakich nie. Dodatkowo będzie można ocenić, które czynniki ryzyka w największym stopniu zaburzają stabilność systemu produkcyjnego.

Przyjęto, że system będzie stabilny, jeśli wielkość produkcji będzie wynosić $W = 1260 \pm 10\%$ szt./zmianę produkcyjną. Analizy wariantów przeprowadzonych badań nad wielkością wpływu poszczególnych czynników ryzyka na system produkcyjny przedstawiono w przykładzie (pkt 7.1–7.3).

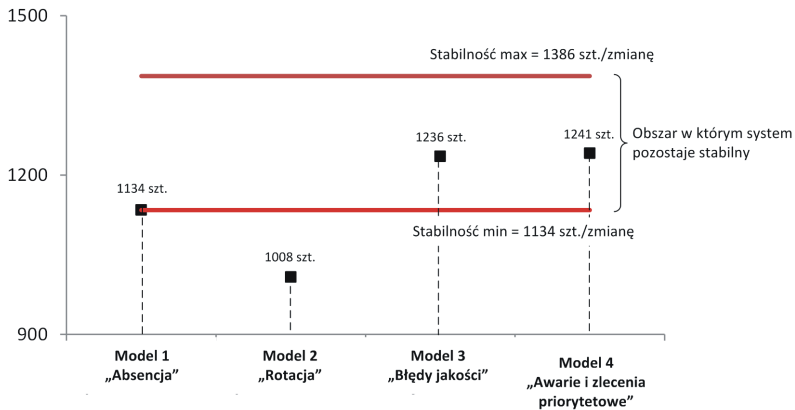
*Ocena stabilności systemu produkcyjnego
w przypadku wystąpienia pojedynczego czynnika ryzyka*

Do oceny stabilności analizowanego systemu produkcyjnego w przypadku wystąpienia pojedynczego czynnika ryzyka wykorzystano model bazowy. Do modelu bazowego dla wszystkich analizowanych gniazd produkcyjnych wprowadzono charakterystyki poszczególnych rodzajów zaobserwowanych czynników ryzyka. Sposób budowy modeli pokazano w tabeli 17.

Uzyskane wyniki z eksperymentów symulacyjnych na modelach pokazanych w tabeli 17 przedstawiono na rysunku 67.

Tabela 17. Zestawienie modeli i celów ich budowy
w analizie stabilności systemu z jednym czynnikiem ryzyka

	Nazwa modelu	Cel budowy
Model bazowy	Model 1 „Absencja”	Wpływ na stabilność systemu produkcyjnego braku pracowników z powodu nieplanowanego urlopu lub zwolnienia chorobowego
	Model 2 „Rotacja”	Analiza stabilności systemu produkcyjnego przy spadku wydajności spowodowanej zatrudnieniem nowych pracowników
	Model 3 „Błędy jakości”	Analiza stabilności systemu produkcyjnego w przypadku wyprodukowania wyrobów wadliwych i konieczności ich naprawy
	Model 4 „Awarie i zlecenia priorytetowe”	Analiza stabilności systemu produkcyjnego w przypadku wystąpienia awarii maszyn oraz przyjęcia do realizacji zleceń priorytetowych



Rys. 67. Wpływ pojedynczego typu czynnika ryzyka na stabilność analizowanego systemu produkcyjnego

Jak wynika z rysunku 67, jeśli czynniki ryzyka wystąpią pojedynczo, to tylko w przypadku rotacji pracowników, czyli konieczności zatrudnienia nowych, nie-doświadczonych osób, system nie będzie stabilny. Oznacza to, że tylko w tym przypadku nie zostanie zrealizowany cel produkcyjny, czyli produkcja $1260 \pm 10\%$ sztuk wiązek/zmianę.

Na rysunku 67 pokazano również wielkość wpływu czynników ryzyka na system produkcyjny. Widać to po liczbie sztuk wyrobów produkowanych przez system w trakcie zmiany produkcyjnej. Najbardziej negatywny wpływ ma czynnik związany z rotacją pracowników – po jego wystąpieniu produkcja spada do poziomu 1008 sztuk/zmianę produkcyjną. Najmniejsze oddziaływanie mają awarye i zlecenia priorytetowe. Przy tym czynniku ryzyka produkcja zmniejsza się jedynie o 19 sztuk wyrobów na zmianę produkcyjną.

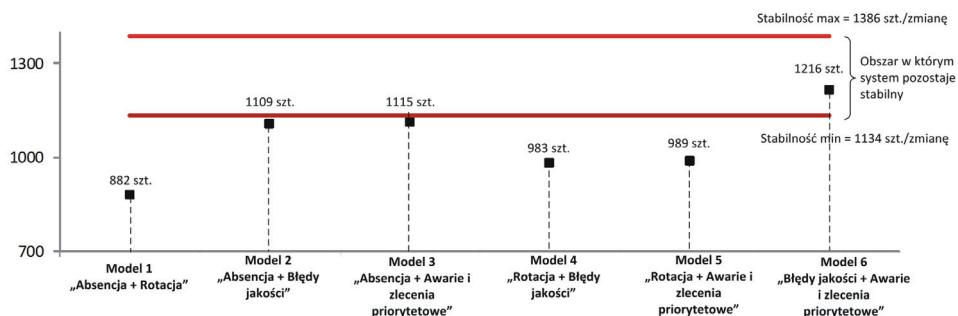
Ocena stabilności systemu produkcyjnego w przypadku wystąpienia dwóch czynników ryzyka

Podobnie, jak w przypadku badań po wystąpieniu jednego z czynników ryzyka, posłużono się modelem bazowym. W tym przypadku wprowadzono jednak charakterystykę poszczególnych par czynników ryzyka. Sposób budowy modeli przedstawiono w tabeli 18 i uzyskane wyniki z eksperymentów symulacyjnych na modelach na rysunku 68.

Z równoczesnym wystąpieniem dwóch z zaobserwowanych czynników ryzyka system pozostaje stabilny tylko w przypadku ryzyka wyprodukowania braku oraz zaburzeń wynikających z awarii i pojawienia się zleceń priorytetowych. W pozostałych przypadkach system nie będzie mógł zrealizować założonego celu produkcyjnego.

Tabela 18. Zestawienie zbudowanych modeli w celu oceny stabilności systemu z dwoma czynnikami ryzyka

Nazwa modelu	
Model bazowy	Model 1 „Absencja + Rotacja”
	Model 2 „Absencja + Błędy jakości”
	Model 3 „Absencja + Awarie i zlecenia priorytetowe”
	Model 4 „Rotacja + Błędy jakości”
	Model 5 „Rotacja + Awarie i zlecenia priorytetowe”
	Model 6 „Błędy jakości + Awarie i zlecenia priorytetowe”



Rys. 68. Wpływ wystąpienia dwóch czynników ryzyka na stabilność analizowanego systemu produkcyjnego

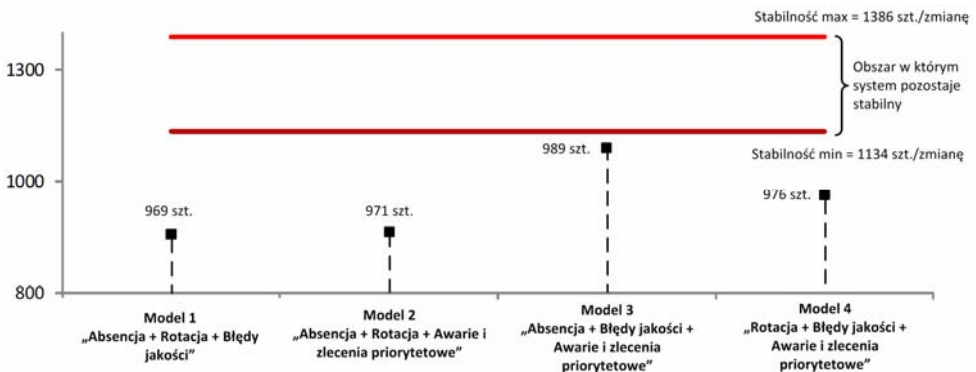
Ocena stabilności systemu produkcyjnego w przypadku wystąpienia trzech czynników ryzyka

W celu oszacowania wpływu równoczesnego wystąpienia trzech czynników ryzyka zbudowano 4 modele symulacyjne. Również do ich budowy zastosowano model bazowy. Nazwy modeli i czynniki ryzyka, których wpływ analizują, pokazano w tabeli 19.

Uzyskane wyniki z eksperymentów symulacyjnych na modelach ujętych w tabeli 19 przedstawiono na rysunku 69. Jak z niego wynika, po wystąpieniu jakiegokolwiek kombinacji trzech czynników ryzyka, analizowany system produkcyjny zostanie wytrącony ze stanu równowagi, natomiast bez poprawy poziomu organizacji produkcji czynniki ryzyka, które w nim występują, uniemożliwią realizację założonego celu.

Tabela 19. Zestawienie modeli zbudowanych w celu oceny stabilności systemu z trzema czynnikami ryzyka

Nazwa modelu	
Model bazowy	Model 1 „Absencja + Rotacja + Błędy jakości”
	Model 2 „Absencja + Rotacja + Awarie i zlecenia priorytetowe”
	Model 3 „Absencja + Błędy jakości + Awarie i zlecenia priorytetowe”
	Model 4 „Rotacja + Błędy jakości + Awarie i zlecenia priorytetowe”



Rys. 69. Wpływ wystąpienia trzech czynników ryzyka na stabilność systemu produkcyjnego

Program naprawczy powinien w głównej mierze ograniczyć rotację i absencję pracowników. Analizowane przedsiębiorstwo powinno opracować i wdrożyć system motywacyjny, który zatrzyma pracowników niezadowolonych z niskiego wynagrodzenia. Reorganizacja linii produkcyjnej opisana w punkcie 4 rozdziału 3, polegająca na wprowadzeniu zmian organizacyjnych umożliwiających zwiększenie produkcji o 40%, powinna przynieść zysk przedsiębiorstwu. Część wypracowanego zysku mogłoby być przeznaczona na nowy system motywacyjny dla pracowników produkcyjnych. Spadek poziomu rotacji i absencji wśród nich jeszcze bardziej zwiększy wydajność produkcji i zwiększy zysk dla przedsiębiorstwa.

4.5. WNIOSKI

W każdym systemie produkcyjnym występują czynniki ryzyka. Jeśli ich wpływ jest zbyt duży, mogą wytrącić system ze stanu równowagi, powodując utratę jego sta-

bilności i niemożność realizacji założonych celów. Analiza, ocena i eliminacja czynników ryzyka jest warunkiem niezbędnym do zapewnienia lub poprawy stabilności produkcji. Dotyczy to zarówno eksploatacji systemów wytwórczych, jak i tych które są reorganizowane lub dopiero projektowane. Proponowane przez literaturę metody ilościowe analizy i oceny ryzyka, zebrane i porównane w podrozdziale 4.1, nie nadają się do zastosowania we współczesnych systemach produkcyjnych. Liczne ograniczenia powodują konieczność upraszczania analizowanych problemów. Dlatego w analizie i ocenie ryzyka w systemach produkcyjnych proponuje się wykorzystanie zaprezentowanych w podrozdziałach 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3 metod niezawodnościowych. Ich dodatkową zaletą jest możliwość prowadzenia analiz na różnych poziomach szczegółowości, dekomponując system produkcyjny zgodnie ze strukturą produkcyjną przedstawioną na rysunku 14.

Ocena i eliminacja ryzyka nie jest jedynym warunkiem, który zapewni stabilność systemu produkcyjnego. Konieczne jest również odpowiednie sterowanie systemem, czyli podejmowanie decyzji w odpowiednio krótkim czasie o wielkościach, rodzajach i parametrach wejść do systemu produkcyjnego. Decyzje te podejmowane są na podstawie odczytanych wartości parametrów przebiegu procesów. Podejmowane decyzje mają zapewnić jak najmniejszą różnicę między wartościami wyjść zaplanowaną w planie produkcji a uzyskanymi w rzeczywistości. Opisane w rozdziale 3 modele symulacyjne dostarczają bardzo wielu informacji na temat przebiegu i wyników systemu produkcyjnego. Zachowując pewne ograniczenia, można je wykorzystać do sterowania systemem produkcyjnym. Jednak ze względu na ich wady przedstawione m.in. w tabeli 6, w sterowaniu systemem produkcyjnym bardziej właściwe jest zastosowanie modeli sztucznych sieci neuronowych.

5. ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH W MODELOWANIU PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

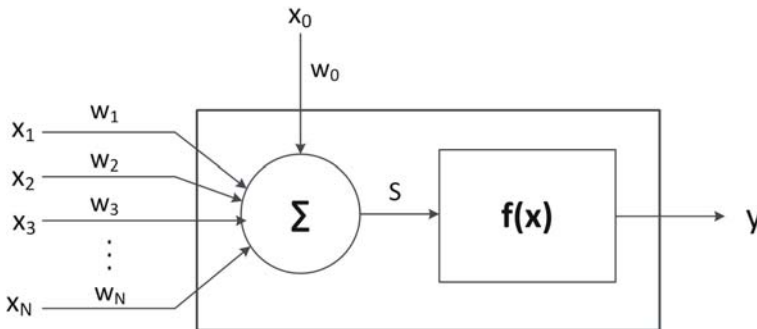
W rozdziale scharakteryzowano modelowanie systemów produkcyjnych za pomocą nowoczesnych, empirycznych systemów obliczeniowych – tzw. sztucznych sieci neuronowych (SSN). Przedstawiono historię rozwoju sieci neuronowych, ich klasyfikację oraz metody uczenia. Wymieniono najważniejsze zastosowania sztucznych sieci neuronowych w eksploatacji systemów produkcyjnych oraz ich zalety i wady. Rozdział zilustrowano dwoma przykładami praktycznego zastosowania modeli SSN sterowaniu procesem produkcyjnym, przez analizę i ocenę jego stabilności. Za przykłady wybrano sterowaniem procesem produkcji wiązek elektrycznych oraz niestabilnym procesem wydobywania rudy miedzi. Rozdział kończy się zestawieniem danych wejściowych i wyjściowych wykorzystywanych do uczenia sieci i przeprowadzania eksperymentów.

Sieci neuronowe (SSN, ang. *Artificial Neural Network*) można traktować jako nowoczesne systemy obliczeniowe, które przetwarzają informacje, wzorując się na zjawiskach zachodzących w mózgu człowieka [206]. Sieć neuronowa jest modelem matematycznym, składającym się z sieci węzłów obliczeniowych, zwanych neuronami, i ich połączeń. Dodatkowo ma zdolność do uczenia się. SSN składają się z dużej liczby elementów przetwarzających informacje (sztucznych neuronów). W stosunku do neuronów naturalnych ich sztuczne odpowiedniki są bardzo uproszczone (nawet sprymityzowane). Sztuczne neurony, tak jak ich odpowiedniki naturalne, są połączone za pomocą połączeń, których parametry (wagi) są modyfikowane w tzw. procesie uczenia się. Większość sieci ma budowę wielowarstwową, przy czym wyróżnia się warstwę wejściową i wyjściową oraz tzw. warstwy ukryte. Sygnały wejściowe, będące danymi z procesu produkcyjnego, są przetwarzane przez sieć i podawane na wyjściu jako rozwiązanie zadania. Mówiąc inaczej, SSN mogą być traktowane jako tzw. czarne skrzynki, potrafiące rozwiązać badany problem z większą dokładnością niż metody klasyczne, bez potrzeby rozumienia wszystkich relacji pomiędzy elementami systemu.

Z dużym prawdopodobieństwem odniesienia sukcesu można je stosować do odwzorowywania złożonych zależności między sygnałami wejściowymi a wybranymi sygnałami wyjściowymi, bez konieczności budowania skomplikowanych modeli matematycznych [178, 193].

5.1. OPIS SPOSOBU FUNKCJONOWANIA SIECI NEURONOWYCH

Sztuczne sieci neuronowe korzystają z bardzo uproszczonego modelu matematycznego neuronu biologicznego. Schematyczny model sztucznego neuronu przedstawiono na rysunku 70.



Rys. 70. Model sztucznego neuronu

Sposób działania sztucznego neuronu, przedstawiony na rysunku 70, można określić następująco [89, 158, 159, 193, 206]:

- Do neuronu docierają wartości wejściowe (sygnały) w postaci danych, w celu prowadzenia przez sieć obliczeń. Dane te pochodzą zazwyczaj z zewnątrz lub stanowią wyjścia z innych neuronów wchodzących w skład sieci. Każdy neuron ma określoną liczbę wejść (tzw. zmiennych niezależnych – x_i) i dokładnie jedno wyjście (zmienną zależną – y). W neuronach biologicznych zmienne niezależne są odpowiednikami dendrytów, a zmienna zależna jest odpowiednikiem aksonu.
- Zestaw sygnałów wejściowych tworzy wektor, który można interpretować jako punkt w n -wymiarowej przestrzeni \mathbf{X} , nazywanej przestrzenią wejść, co można zapisać w postaci:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (58)$$

gdzie T jest symbolem transpozycji.

- Każda zmienna niezależna x_i jest dostarczana do neuronu przez połączenie o pewnej sile (wadze – w_i). Wagi te odpowiadają synapsom w neuronie biologicznym i są odpowiednikiem efektywności transmisji i oddziaływania biologicznego hormonu (tzw. neuromediatora albo neurotransmitera) w obrębie poszczególnych synaps w neuronie biologicznym.
- Synapsę nazywa się pobudzającą, jeśli $w_i > 0$ lub hamującą, jeśli $w_i < 0$. Wartość $w_i = 0$ świadczy o braku połączeń pomiędzy neuronami. Zestaw n współczynników

wagowych można rozpatrywać jako wektor wyznaczający punkt w n -wymiarowej przestrzeni W nazywanej przestrzenią wag:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (59)$$

W neuronie obliczana jest ważona suma wejść (tzn. suma wartości sygnałów wejściowych pomnożona przez odpowiednie współczynniki wagowe), od której odejmowana jest wartość progowa. Odbywa się to w tzw. bloku symulacyjnym oznaczonym na rysunku 70 jako s . Blok symulacyjny, wraz z funkcją aktywacji oznaczoną na rysunku 70 jako $f(x)$, stanowi odpowiednik ciała komórki nerwowej w neuronie biologicznym. Neuron przechodzi do stanu zapłonu tylko wtedy, gdy łączny sygnał wejściowy przekroczy ustalony poziom progowy. W zależności od tego czy waga danego wejścia (synapsy) jest dodatnia, czy ujemna, wyróżnia się dwa potencjały postsynaptyczne – potencjał pobudzający (EPSP) i hamujący (IPSP). Potencjały postsynaptyczne podlegają złożonym procesom sumowania przestrzennego oraz sumowania czasowego, dając w konsekwencji sygnał łącznego pobudzenia.

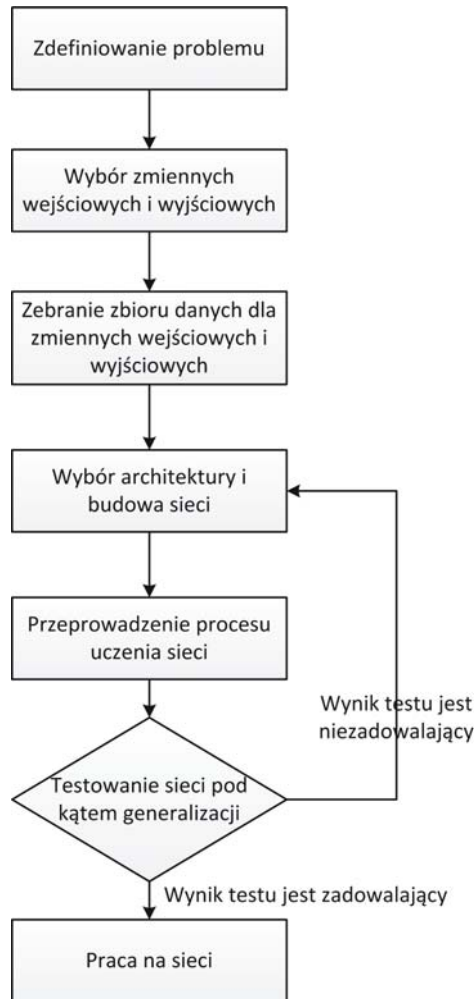
- Sygnał łącznego pobudzenia neuronu przekształcany jest przez tzw. funkcję aktywacji neuronu $f(x)$, nazywaną również funkcją przejścia. Funkcja ta może przybierać różną postać. Najczęściej stosowanymi funkcjami aktywacji neuronu są funkcje nieciągłe – progowa (unipolarna) i signum (bipolarna) oraz ciągłe – liniowa, sigmoidalna i tangensoidalna. Wartość obliczona przez funkcję aktywacji jest wartością wyjściową (sygnałem wyjściowym), oznaczona na rysunku 70 jako y .

- Sztuczny neuron może w czasie działać zarówno dyskretnie, jaki i w sposób ciągły.

Ponieważ pojemność informacyjna pojedynczego neuronu nie jest duża (nie może on zapamiętać zbyt wielu wzorców), zwiększa się ją przez łączenie pojedynczych neuronów w sieć. Sieć neuronowa składa się z warstw tworzonych przez poszczególne neurony, a liczba warstw w sieci określa jej wielkość. Wartości wyjściowe, wyznaczone dla neuronów jednej warstwy, wprowadzane są na wejścia neuronów warstwy następnej. Wyróżnia się trzy rodzaje warstw sieci:

- warstwę wejściową – jest to pierwsza warstwa składająca się z neuronów, do których wejść doprowadzane są wartości zmiennych wejściowych; w większości modeli sieci neuronowych rola neuronów wejściowych sprowadza się do przesyłania informacji dalej lub ewentualnie do skalowania oraz normalizacji danych wejściowych, jeśli nie zostało to zrobione wcześniej [138]; liczba neuronów znajdujących się w tej warstwie jest równa liczbie wartości wprowadzanych do sieci.
- warstwę wyjściową – składającą się z neuronów wyznaczających wynik obliczeń traktowany jako wartość wyjściową całej sieci,
- warstwę ukrytą – znajdującą się pomiędzy warstwą wejściową i wyjściową, może składać się z różnej liczby warstw, a rola jej polega na przetwarzaniu informacji wejściowych w wyjściowe.

Do zdefiniowania sieci neuronowej potrzebne jest zdefiniowanie konkretnego modelu neuronu, zdefiniowanie typologii sieci, wybór algorytmu uczenia oraz zgromadzenie odpowiednio dużego zbioru danych na temat zmiennych wejściowych i wyjściowych. Uproszczony schemat etapów budowy sieci neuronowej przedstawiono na rysunku 71.



Rys. 71. Etapy budowy sieci neuronowej

Budowa sieci neuronowej rozpoczyna się od zdefiniowania problemu, którego sieć będzie miała rozwiązać lub inaczej określić zmienną prognozowaną. Następnie należy zdefiniować zmienne wejściowe i wyjściowe [138]. Pomiędzy zmiennymi wejściowymi (służącymi do wprowadzenia wartości zmiennych obserwowanych na zewnątrz)

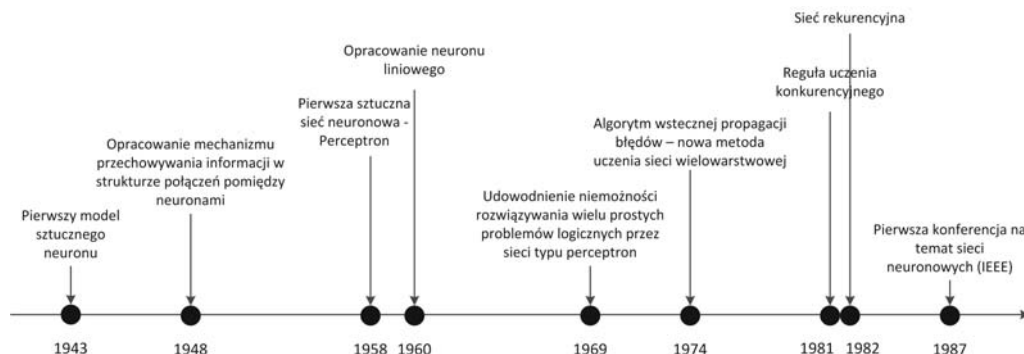
i zmiennymi wyjściowymi (będącymi wynikiem obliczeń sieci) musi istnieć wyraźny związek. Aby przetestować sieć za pomocą danych, z którymi nie miała styczności, należy zbiór danych podzielić na dwa podzbiory. Jeden zbiór będzie służył do uczenia sieci, a drugi do testowania.

Kolejnym krokiem jest wybór architektury sieci. Należy tu zdefiniować zestaw parametrów takich, jak: liczba neuronów, sposób ich uporządkowania w warstwy, liczba warstw, połączenia synaptyczne, rodzaj uczenia i typ funkcji aktywacji. Tak zdefiniowana architektura sieci poddawana jest procesowi uczenia, czyli adaptacyjnego dopasowywania parametrów, którego celem jest ustalenie wartości wag połączeń synaptycznych i współczynników funkcji aktywacji neuronów.

Następny krok, po procesie uczenia, to testowanie sieci pod kątem jej zdolności do generalizacji (uogólniania) z użyciem wybranej miary jakościowej. Na tym etapie sprawdza się jakość odpowiedzi sieci na osobnym zbiorze danych zwanych zbiorem testującym. Jeśli etap ten zakończy się pomyślnie, można rozpocząć pracę za pomocą sieci. O ile metody uczenia i testowania są dobrze znane, to metody doboru optymalnej architektury do rozwiązywanego problemu są słabo rozwinięte i opierają się głównie na doświadczeniu i intuicji projektanta sieci [106, 206].

5.2. HISTORIA SIECI NEURONOWYCH

Cały XIX i większość XX wieku to dominacja modelowania matematycznego i teorii systemów [206]. Metody te zazwyczaj doprowadzają do znalezienia rozwiązania problemu i dobrych wyników. Jednak budowa modeli matematycznych wymaga dużo czasu i stosowania zaawansowanego aparatu matematycznego. Za najważniejsze w rozwoju SN uznaje się etapy przedstawione na rysunku 72.



Rys. 72. Najważniejsze etapy w historii powstania i rozwoju sieci neuronowych

Zaprezentowane na rysunku 72 najważniejsze etapy w historii powstania i rozwoju sztucznych sieci neuronowych można scharakteryzować następująco:

- Pierwszy model sztucznego neuronu, do przetwarzania informacji w sieciach logicznych, zbudowany został w 1943 roku przez W. McCullocha i W. Pittsa jako wynik prac nad modelem matematycznym neuronu ludzkiego. Niestety, moc maszyn liczących w tamtych czasach nie ułatwiła realizacji większych sieci.
- W 1948 roku D. Hebb, podczas prac nad zasadami adaptacji systemów nerwowych, wyjaśnił mechanizm przechowywania informacji w strukturze połączeń między neuronami. Na tej podstawie opracował metodę trenowania sieci przez zmianę wartości współczynników połączeń między neuronami, zwaną dzisiaj regułą Hebba.
- W 1958 roku F. Rosenblat opracował i zbudował sztuczną sieć neuronową zwaną perceptronem, w której neurony zorganizowano w formie warstw następujących po sobie, a przepływ sygnałów następował tylko od warstwy wejściowej do wyjściowej.
- W 1960 roku opracowano neuron liniowy (typu adaline, ang. *ADaptive LINear Element* lub *madaline*, czyli sieci z wielu elementów *adaline*), gdzie zastosowano algorytm najmniejszych kwadratów do adaptacji wag. Autorem tej sieci neuronowej byli B. Widrow i M. Hoff.
- W 1969 roku w książce M. Minsky'ego i S. Paperta pt. *Perceptrons* udowodniono niemożność rozwiązywania wielu prostych problemów (np. funkcji logicznej alternatywy wykluczającej XOR) przez sieci jednowarstwowe typu perceptron. Wówczas nastąpiło zniechęcenie wielu środowisk naukowych w prowadzeniu badań nad sztucznymi sieciami neuronowymi.
- Powrót do zainteresowania sztucznymi sieciami neuronowymi nastąpił po opracowaniu algorytmu wstecznej propagacji błędów (ang. *Error Back Propagation*), który umożliwił opracowanie nowej metody uczenia sieci wielowarstwowej. Algorytm ten usuwał wiele ograniczeń wskazanych przez Minsky'ego, a opracowany został niezależnie przez P. Werbosa, D. Parkera oraz D. Rumelharta, odpowiednio w latach 1974, 1982 i 1986.
- W 1981 roku Kohonen zaproponował regułę uczenia konkurencyjnego, w której, w odróżnieniu od reguły standardowej, modyfikacji wag dokonuje się nie tylko dla neuronu zwycięskiego, lecz również dla pewnej liczby neuronów z jego otoczenia. Sieć Kohonena nazywana jest tzw. siecią samoorganizującą się (ang. *Self-Organizing Map*) działającą na zasadzie uczenia konkurencyjnego.
- W 1982 roku opracowana została sieć ze sprzężeniem zwrotnym (tzw. rekurencyjna), gdzie na skutek istnienia sprzężeń zwrotnych pojawiają się dynamiczne procesy przejściowe. Autorem tej sieci był J. Hopfield.
- W 1987 roku w San Diego odbyła się pierwsza otwarta konferencja na temat sieci neuronowych (*IEEE International Conference on Neural Networks*), w której wzięło udział 1700 uczestników.

- Obecnie sieci neuronowe są budowane w identyfikacji, klasyfikacji i analizie obrazów, rozpoznawaniu wzorców, aproksymacji, optymalizacji, przetwarzaniu sygnałów i sterowaniu. Ich zastosowanie praktyczne można znaleźć prawie we wszystkich dziedzinach nauki i techniki [206]. Prawie co 5 sekund na świecie ukazuje się publikacja naukowa na temat sieci neuronowych [194], do 2000 roku wydano ponad 7000 podręczników na temat sieci neuronowych [194].

5.3. OGÓLNA KLASYFIKACJA SIECI NEURONOWYCH

Ponieważ możliwości pojedynczego neuronu są bardzo ograniczone ze względu na jego możliwości obliczeniowe i ilość gromadzonych informacji, stąd też zazwyczaj w obliczeniach stosuje się sieci neuronowe. Operacje wykonywane przez sieci wykonywane są równoległe przez wszystkie neurony, co znacznie poprawia szybkość obliczeń i zwiększa odporność na uszkodzenia nawet znaczącej liczby neuronów i powiązań między nimi.

Topologia sieci neuronowych, czyli sposób rozmieszczenia i połączeń neuronów, determinuje funkcjonalność sieci oraz sposób przetwarzania przez nią danych. Stąd w literaturze przedmiotu można spotkać bardzo różne klasyfikacje sieci neuronowych, jednak najczęściej za najważniejsze kryteria klasyfikacyjne przyjmuje się liczbę warstw sieci, kierunek przepływu informacji oraz sposób uczenia [78, 122, 193, 206].

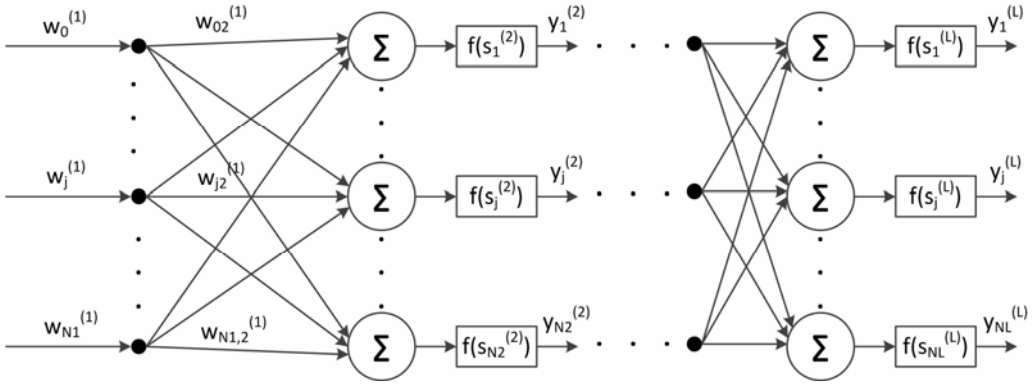
Najpopularniejszymi modelami sztucznych sieci neuronowych są sieci typu wielowarstwowy perceptron. Ponieważ sieci tego typu są również najczęściej wykorzystywane w modelowaniu procesów produkcyjnych i technologicznych, dalej przedstawiono ich krótką charakterystykę [206].

5.3.1. SIECI JEDNO- I WIELOWARSTWOWE

Ze względu na liczbę warstw w sieci, sztuczne sieci neuronowe można podzielić na jedno- i wielowarstwowe. Sieć tego typu jednowarstwowy perceptron składa się z pojedynczej warstwy neuronów progowych wyjściowych, do których sygnały dostarczane są bezpośrednio z wejść o różnych, określonych wagach. Połączenie węzłów wejściowych z neuronami warstwy wyjściowej jest typu każdy z każdym, tzn. każdy węzeł z każdym neuronem. Węzły wejściowe nie tworzą warstw neuronów, gdyż nie zachodzi w nich żaden proces obliczeniowy.

W sieciach wielowarstwowych, oprócz warstwy wejściowej i wyjściowej, występuje również jedna lub więcej warstw ukrytych. W sieciach jednokierunkowych, których przykładem jest wielowarstwowy perceptron, każdy neuron w warstwie poprzedniej ma bezpo-

średnie połączenie z neuronem w warstwie następnej, a siła tego połączenia określana jest przez wagi w_{ij} . Sygnały wyjściowe kolejnych warstw stają się wejściami do warstw następnych. Schemat wielowarstwowej sieci typu perceptron przedstawiono na rysunku 73.



Rys. 73. Schemat sztucznej sieci neuronowej typu wielowarstwowy perceptron [206]

gdzie: L – liczba warstw w sieci, N_k – liczba neuronów w warstwie k -tej ($k = 1, \dots, L$), N_0 – liczba sygnałów wejściowych, $y_i^{(k)}$ – sygnał wyjściowy i -tego neuronu w warstwie k -tej ($k = 2, \dots, L$), $y^{(k)} = [y_1^{(k)}, \dots, y_{N_k}^{(k)}]^T$, $x_i^{(k)}$ – sygnał wejściowy i -tego neuronu w k -tej warstwie ($i = 0, \dots, N_{k-1}$; $k = 1, \dots, L$), $\mathbf{x}^{(k)} = [x_0^{(k)}, \dots, x_{N_{k-1}}^{(k)}]^T$ – wektor sygnałów wejściowych warstwy k -tej,

$$x_i^{(k)} = \begin{cases} x_i^{(1)} & \text{dla } k = 1, \dots, N_0 \\ y_i^{(k-1)} & \text{dla } k = 2, \dots, L \\ +1 & \text{dla } i = 0, \quad k = 1, \dots, L \end{cases}$$

$w_{ij}^{(k)}$ – waga j -tego wejścia, i -tego neuronu z k -tej warstwy ($i = 1, \dots, N_k$; $k = 1, \dots, L$; $j = 1, \dots, N_{k-1}$), $\mathbf{w}_i^{(k)} = [w_{i0}^{(k)}, \dots, w_{iN_{k-1}}^{(k)}]^T$ – wektor wag i -tego neuronu z warstwy k -tej, $\mathbf{W}^{(k)} = [w_1^{(k)}, \dots, w_{N_k}^{(k)}]$ – macierz warstw warstwy k -tej.

5.3.2. SIECI JEDNOKIERUNKOWE I REKURENCYJNE

Ze względu na kierunek przepływu informacji sztuczne sieci neuronowe dzieli się na sieci jednokierunkowe i rekurencyjne. Sieci te są zbudowane z jednej lub kilku warstw. W sieciach jednokierunkowych przepływ sygnału przebiega w ściśle określ-

nym kierunku – od warstwy wejściowej, przez ewentualne warstwy ukryte, do warstwy wyjściowej. Zwykle wszystkie neurony warstwy poprzedniej połączone są ze wszystkimi neuronami warstwy następnej. Najczęstszym rodzajem sieci jednokierunkowej jest wielowarstwowy perceptron przedstawiony na rysunku 73.

W sieciach rekurencyjnych występuje sprzężenie zwrotne, tzn. wyjście przynajmniej jednego neuronu jest połączone pośrednio lub bezpośrednio z jego wejściem. Tym samym stan wyjść sieci zależy od poprzednich stanów wyjściowych, a w związku z tym od poprzednich wartości sygnałów wejściowych. Do sieci wielowarstwowych rekurencyjnych najczęściej zalicza się sieci Hopfielda, sieci Hamminga, sieci Elmana, sieci BAM (ang. *Bidirectional Associative Memory*), RMLP (ang. *Recurrent Multi-Layer Perceptron*) oraz sieci RTRN (ang. *Real Time Recurrent Network*).

5.3.3. KLASYFIKACJA SIECI ZE WZGLĘDU NA SPOSÓB UCZENIA

Uczenie sztucznych sieci neuronowych to proces ich adaptowania na podstawie otoczenia do wypracowywania lepszych zachowań na sytuacje występujące w tym otoczeniu [136]. Innymi słowy, jest to wymuszenie określonej reakcji sieci na zadane sygnały wejściowe. Rozróżnia się cztery podstawowe rodzaje metod uczenia sieci, a przez to cztery rodzaje sieci neuronowych.

Uczenie z nadzorem. To rodzaj uczenia, w którym niezbędny jest nauczyciel. W uczeniu tego typu na wejście do sieci są podawane kolejne bodźce, na które sieć odpowiada. Dzięki nauczycielowi znana jest odpowiedź pożądana. Różnica pomiędzy odpowiedzią sieci a odpowiedzią nauczyciela nazywana jest błędem. Błąd ten jest wykorzystywany do modyfikacji wartości wag połączeń synaptycznych w taki sposób, aby był on jak najmniejszy. Ucząc się na przykładach zadawanych przez nauczyciela, sieć zdobywa wiedzę, którą uogólnia i wykorzystuje później w pracy, gdy nie ma już nauczyciela. Najpopularniejszą regułą uczenia z nadzorem jest reguła perceptronu.

Uczenie bez nadzoru. Odbywa się bez pomocy nauczyciela, sieć więc nie ma wiedzy na temat pożądanego zachowania w reakcji na bodziec zewnętrzny. Zewnętrzne bodźce są grupowane w klasy na zasadzie podobieństwa. W procesie uczenia nowe bodźce podawane na wejście sieci są dołączane do klas istniejących lub tworzą nową. W czasie wykrywania zależności parametry się zmieniają – następuje samoorganizacja sieci. Sygnałem uczącym jest sygnał wyjściowy sieci. W tej strategii najczęściej wykorzystuje się regułę Hebb'a.

Uczenie ze współzawodnictwem. To rodzaj uczenia, w którym neurony konkurują między sobą o uzyskanie stanu aktywacji. Po podaniu bodźca na wejście sieci neurony konkurujące generują odpowiedź, która jest następnie porównywana z odpowiedzią prawidłową (pożądaną). Wygrywa ten neuron, którego odpowiedź jest najbliższa odpowiedzi pożądaney. Z tej strategii korzystają sieci zbudowane z neuronów WTA lub WTM.

Uczenie ze wzmocnieniem nazywane jest również uczeniem z krytykiem. Wejściem do tego typu sieci jest stan środowiska, a wyjściem proponowane przez sieć działania. W tym przypadku tzw. krytyk nie ocenia stopnia dopasowania wyjścia sieci i pożądanej odpowiedzi, lecz jej efekt działania. Gdy efekt działania jest pozytywny, wówczas następuje wzmocnienie połączenia pomiędzy neuronami, jeśli natomiast efekt jest negatywny, to następuje osłabienie połączenia, co będzie w przyszłości skutkowało wzmocnieniem lub osłabianiem tendencji sieci do podejmowania danych działań.

5.4. ZASTOSOWANIE, ZALETY I WADY SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH

Sztuczne sieci neuronowe stosowane są najczęściej do rozwiązywania problemów związanych z aproksymacją i interpolacją, predykcją, klasyfikacją, rozpoznawaniem i sterowaniem [158, 178, 193, 206]. W przemyśle około 70% wszystkich zastosowań to rozpoznawanie obrazów obejmujące również klasyfikacje, grupowanie i przetwarzanie [120]. Coraz częściej w zarządzaniu i eksploatacji systemów produkcyjnych SSN stosuje się do [2, 10, 76, 87, 120, 179, 219]:

- sterowania procesami produkcyjnymi, robotami,
- analizy problemów produkcyjnych,
- diagnostyki układów elektronicznych maszyn,
- dobierania rodzaju pracowników i materiałów wejściowych,
- optymalizacji działalności handlowej, użycia odpadów, ruchów robota,
- planowania remontów maszyn,
- prognozowania.

Do głównych zalet SSN w stosunku do innych metod obliczeniowych można zaliczyć [119, 206]:

- równoległe i rozproszone przetwarzanie informacji, co umożliwia przeprowadzanie analiz w odpowiednio krótkim czasie,
- możliwość modelowania zjawisk, systemów, procesów jedynie na podstawie danych historycznych bądź pomiarowych, bez konieczności budowy modelu matematycznego, który w przypadku systemów produkcyjnych może być bardzo skomplikowany,
- zdolność do adaptacji i uczenia się,
- większa efektywność analizy dużej liczby danych, co daje szansę na analizę procesów ze sporymi zakłóceniami procesów dynamicznie zmiennych, danych rozmytych, a nawet procesów chaotycznych,

- nie wymagają programowania, tzn. rola programisty sprowadza się do zaprojektowania odpowiedniej, w stosunku do rodzaju problemu, struktury sieci oraz do umiejętnego pokierowania procesem uczenia się,
- zdolność do uogólniania (generalizacji), tzn. jest w stanie aproksymować dowolną funkcję wielu zmiennych i jest w stanie uogólniać nabytą wiedzę na nieznaną jej problemy o podobnym charakterze,
- możliwość modelowania dowolnie skomplikowanych nieliniowo zależności, gdzie w przeciwieństwie do metod matematycznych występuje silne uzależnienie od wzrostu wymiaru zagadnienia lub liczby stopni swobody,
- odporność na zakłócenia powstałe w wyniku uszkodzeń lub wadliwego działania poszczególnych neuronów.

Słabościami SSN są natomiast [206]:

- trudności w wydobywaniu wiedzy z nauczonej sieci neuronowej, ponieważ sieci opisywana są modelem tzw. czarnej skrzynki,
- dokładność obliczeń sieci jest uzależniona od dużej liczby danych w zbiorze uczącym,
- brak rozumowania wieloetapowego, czyli w przypadku, gdy wnioski końcowe są wyciągane na podstawie wyników poprzednich. Rozumowanie wieloetapowe wymaga zastosowania kilku sieci.

Podstawowym celem modelowania dynamiki procesu produkcyjnego jest rozpoznanie zmienności czasowych jego wielkości fizycznych lub stanów [206]. W tym celu należy wyznaczyć szereg czasowy, czyli uporządkowany ciąg wartości pewnej zmiennej w czasie. Szereg czasowy może mieć postać wektora $[y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)]$. Ze względu na to, że parametry procesów mogą różnić się w poszczególnych jego fazach, dlatego wektor szeregu czasowego może przyjmować postać wektora określonego w n -wymiarowej przestrzeni. Poszczególnymi składowymi tego wektora będą stany etapów procesu produkcyjnego w przeszłości, które można z kolei traktować jako punkty w wielowymiarowej przestrzeni wyjściowej. Zadanie analizy zmienności czasowej procesu produkcyjnego można sprowadzić do szukania w przestrzeni N -wymiarowej pewnej trajektorii, po której „porusza się” analizowana zmienna wyjściowa procesu. Daną wielkość, mającą postać szeregu czasowego, wyznacza się więc po to, aby przewidzieć jej wartość w przyszłości.

Sieć neuronowa jednokierunkowa może opisywać prawidłowości występujące w szeregu czasowym oraz umożliwia prognozowanie przyszłych jego wartości. Zwykle prognozuje się przyszłą wartość szeregu czasowego $y(t+1)$ na podstawie bieżącej i k przeszłych wartości y szeregu oraz bieżącej i l przeszłych wartości zmiennych wejściowych x zgodnie z zależnością [206]:

$$y(t+1) = f(y(t), y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-k), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-l), w) \quad (60)$$

Ponad 80% wszystkich zastosowań sieci neuronowych stanowią sieci wielowarstwowe jednokierunkowe (bez sprzężeń zwrotnych) [206].

Przykład 8

Zastosowanie modelu SSN w zapewnieniu stabilności systemu produkcji wiązek elektrycznych

Za przykład zastosowania modelu SSN w ocenie stabilności i w sterowaniu systemem produkcyjnym posłuży proces produkcji wiązek elektrycznych przedstawiany już wcześniej w przykładach 5 i 7. Dane i charakterystyka procesu zamieszczona w przykładach 5 i 7 zostaną częściowo wykorzystane do budowy modelu SSN.

Celem budowy modelu SSN było zapewnienie stabilności procesu montażu wiązki elektrycznej. Aby proces montażu można było uznać za stabilny wielkość produkcji powinna być zgodna z ustalonym planem produkcyjnym. W przeciwnym razie należy podjąć działania korygujące polegające na zmianie wartości parametrów wejściowych zasobów produkcyjnych wykorzystywanych w procesie. Ustalono, że granice stabilności procesu wynosić będą $\pm 10\%$ wielkości produkcji założonej w planie produkcyjnym.

Czas montażu wiązki elektrycznej zależy przede wszystkim od liczby modułów wchodzących w jej skład. Związane jest to zarówno z koniecznością montażu, jak i taśmowania większej liczby elementów. Zaplanowaną wielkość produkcji w czasie jednej zmiany roboczej oraz przyjęte granice stabilności przedstawiono w tabeli 20.

Tabela 20. Plan produkcji oraz przyjęte granice stabilności procesu w zależności od liczby modułów w wiązce

Liczba modułów w wiązce [szt.]	Plan produkcji [szt./zmianę]	Granice stabilności [szt./zmianę]
2–4	370	(360–380)
5–7	350	(340–360)
7–9	320	(310–330)
9–12	300	(290–310)

Jak wykazano w przykładzie 7, największe zakłócenia w analizowanym systemie produkcyjnym powoduje czynnik ryzyka – rotacja i absencja pracowników w gnieździe montażu. Nowy pracownik spowalnia pracę całego stanowiska montażu oraz powoduje wzrost liczby wykrytych elementów wadliwych. Ustalono, że nowy pracownik jest w stanie uzyskać odpowiednią wydajność dopiero po 1 miesiącu pracy na danym stanowisku.

W celu prognozowania liczby wyprodukowanych wyrobów, przy zadanych parametrach wejściowych, zbudowano jednokierunkową sieć neuronową typu wielowarstwowy perceptron. Zmienną objaśnianą miała być liczba zmontowanych wiązek elektrycznych dobrej jakości, czyli takich, które pomyślnie przeszły test elektryczny. Na zmienne objaśniające wybrano:

- X1 – liczbę modułów w wiązce,
- X2 – umiejętności pracownika 1,
- X3 – umiejętności pracownika 2,
- X4 – umiejętności pracownika 3,
- X5 – umiejętności pracownika 4,
- X6 – czas taśmowania,
- X7 – liczbę elementów wadliwych wykrytych na stanowisku testu elektrycznego.

Dla zwartościowania parametru umiejętności pracowników wprowadzono 4 wartości:

- 1 – pracownik pracujący poniżej 1 tygodnia,
- 2 – pracownik pracujący poniżej 2 tygodni,
- 3 – pracownik pracujący poniżej 4 tygodni,
- 4 – pracownik doświadczony.

Dane zebrano na podstawie obserwacji i pomiarów procesu rzeczywistego oraz analizy dokumentacji organizacyjnej i protokołów kontroli jakości. W sumie dysponowano 378 pomiarami dla każdej zmiennej. Zbiór ten podzielono na dwie części, z których jedna posłużyła jako zbiór uczący, a druga jako część do testowania sieci.

Eksperyment wykonano w środowisku programu SAS Enterprise Miner 6.2. Pierwszym krokiem było zbadanie korelacji między zmiennymi objaśniającymi a zmienną objaśnianą. Wyniki zawierające wartość korelacji przedstawione są w tabeli 21.

Tabela 21. Wartości korelacji pomiędzy analizowanymi zmiennymi

Atrybut (zmienna) objaśniający	Wartość korelacji
Liczba modułów w wiązce	0,16583
Umiejętności pracownika 1	-0,16872
Umiejętności pracownika 2	-0,22465
Umiejętności pracownika 3	-0,14535
Umiejętności pracownika 4	0,03276
Czas taśmowania	0,02104
Liczba elementów wadliwych wykrytych na stanowisku testu elektrycznego	-0,02957

Otrzymane wyniki wskazują, że do analizowanego problemu nie ma sensu używać metody regresji liniowej, a uzasadnione jest skorzystanie z modelu SSN, który buduje modele regresyjne nieliniowe. W dalszych eksperymentach zbudowano model sieci neuronowej typu wielowarstwowy perceptron, dla którego zmieniało liczbę neuronów w warstwie ukrytej.

Dla zbudowanych modeli sieci neuronowych wykonano wiele eksperymentów dla różnej liczby zmiennych objaśniających. Ich celem było ustalenie, dla jakiej kombinacji zmiennych objaśniających sieć neuronowa będzie najlepiej prognozowała liczbę wyprodukowanych wiązek elektrycznych na zmianę produkcyjną. W budowie modeli uwzględniono różne ilości zmiennych objaśniających. Ich wybór był podyktowany wcześniejszymi eksperymentami, czyli zależał od wartości bezwzględnej korelacji

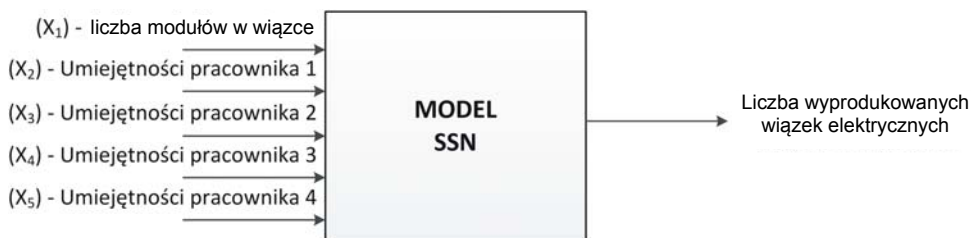
(por. tab. 21). W eksperymencie nr 1 wykorzystane są wszystkie atrybuty wejściowe, w eksperymencie nr 2 zrezygnowano z „czasu taśmowania” (najmniejsza wartość bezwzględna korelacji), w eksperymencie nr 3 zrezygnowano dodatkowo z „ilości elementów wadliwych wykrytych na stanowisku testu elektrycznego” (kolejna najmniejsza wartość bezwzględna korelacji). Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 22, gdzie uzyskane wartości przedstawiają kryterium wyboru sieci, którym jest przeciętny błąd kwadratowy. Wyniki dotyczą analizy wejściowego zbioru danych, który posłużył też do procesu uczenia sieci.

Tabela 22. Wyniki eksperymentów na różnych wariantach zbudowanej SSN

Model sieci neuronowej	Przeciętny błąd kwadratowy			
	Eksperyment nr 1	Eksperyment nr 2	Eksperyment nr 3	Eksperyment nr 4
WWP – LN=4	999,05	2443,71	1056,1	427,08
WWP – LN=8	2537,86	1369,98	1437,86	1019,25
WWP – LN=16	327,08	767,69	375,39	526,14
WWP – LN=32	1219,25	754,22	327,15	2088,12
WWP – LN=48	2375,39	872,49	999,05	368,14
UML	1851,50	1450,28	1851,50	2569,8

Gdzie WWP – sieć typu wielowarstwowy perceptron,
LN – liczba neuronów w warstwie ukrytej,
UML – uogólniony model liniowy.

Dla każdego eksperymentu najgorsze wyniki (o największym przeciętnym błędzie kwadratowym) uzyskano dla sieci neuronowej typu uogólniony model liniowy. Najlepsze wyniki uzyskano dla sieci typu wielowarstwowy perceptron z 32 neuronami dla eksperymentu 3, a schematycznie przedstawiono go na rysunku 74. Model ten został następnie użyty do dalszych eksperymentów, czyli do oceny stabilności procesu montażu wiązek elektrycznych przy różnych wartościach zmiennych objaśniających.



Rys. 74. Zmienne objaśniające i zmienna objaśniana wykorzystana do budowy modelu SSN

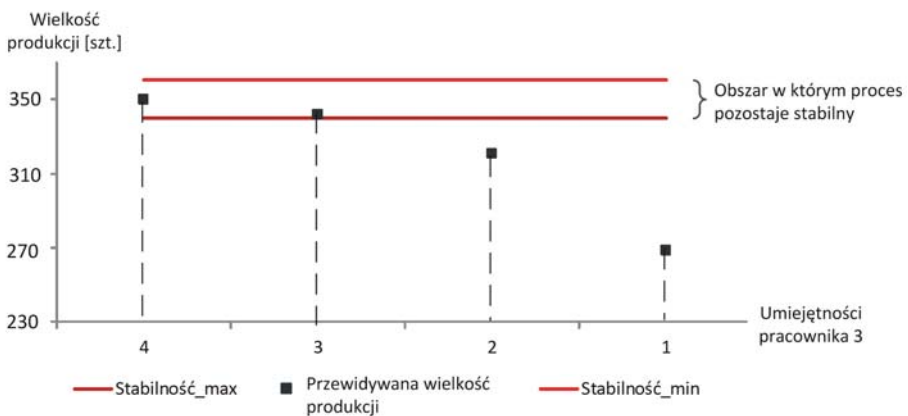
W celu określenia stabilności analizowanego procesu przygotowano dane testowe oraz skorzystano z węzła „ocena punktowa” środowiska SAS Enterprise Mi-

ner 6.2. Dane testowe zawierały różne warianty zmiany atrybutów wejściowych (zmiennych objaśniających). Dla tych danych wybrany model sieci neuronowej przewiduje wartości wyprodukowanych wiązek elektrycznych, które są interpretowane w kontekście stabilności procesu montażu. Przykładowe dane testowe wraz z przewidywaną wielkością wyprodukowanych elementów przedstawione są w tabeli 23 i 24.

Celem eksperymentu 1 było zbadanie jak umiejętności pracowników gniazda montażu wpływają na stabilność analizowanego procesu. Za przykład wybrano wiązkę elektryczną o 7 modułach. W planie produkcji liczba wiązek składających się z 7 modułów zaplanowano na 350 szt./zmianę produkcyjną. W badaniach przyjęto, że proces produkcyjny jest stabilny, jeżeli wartość bezwzględna liczby wyprodukowanych elementów nie przekracza 20 szt./ zmianę, czyli zawiera się w przedziale (340–360 szt. wiązek na zmianę produkcyjną). Tabela 23 przedstawia przewidywaną przez model SSN wielkość produkcji, która zależy od umiejętności pracownika 3, zakładając duże umiejętności pozostałych pracowników.

Tabela 23. Przewidywana wielkość produkcji dla różnych umiejętności pracownika 3 i stałej liczbie montowanych modułów

Wejścia do sieci					Wyjście z sieci
Liczba modułów [szt.]	Umiejętności pracownika 1	Umiejętności pracownika 2	Umiejętności pracownika 3	Umiejętności pracownika 3	Przewidywana wielkość produkcji
7	4	4	4	3	350
7	4	4	3	3	342
7	4	4	2	3	321
7	4	4	1	3	269



Rys. 75. Przewidywana wielkość produkcji wiązek przy stałej liczbie modułów, o różnym poziomie umiejętności pracownika 3

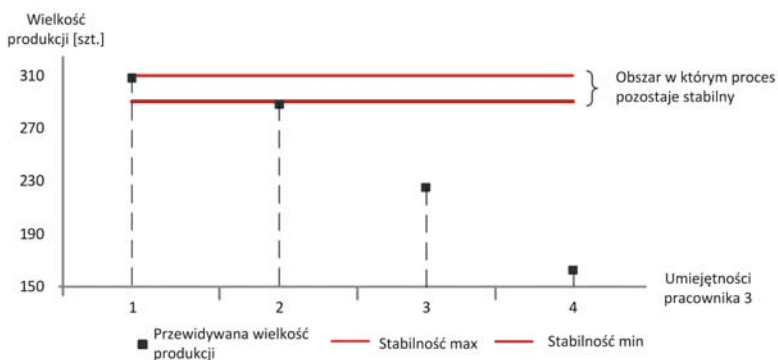
Dane zawarte w tabeli 23, przedstawione w kontekście stabilności procesu, przedstawiono dodatkowo na rysunku 75.

Jak wynika z tabeli 23 i rysunku 75, proces traci stan równowagi, jeśli pracownik 3 wykonuje pracę krócej niż dwa tygodnie. Wynik ten potwierdza obserwacje poczynione w trakcie zbierania danych i analizy procesu. Również potwierdza opinię wśród pracowników i zarządzających procesem, iż dopiero po miesiącu wykonywania operacji montażu nowy pracownik jest w stanie pracować zgodnie z taktem przyjętym dla gniazda montażu, a liczba wykrytych produktów wadliwych wraca do założonego poziomu.

Celem kolejnego eksperymentu było sprawdzenie czy przy tych samych umiejętnościach pracowników stabilność procesu będzie analogiczna dla większej liczby modułów wchodzących w skład wiązki elektrycznej. Za przykład posłużyła wiązka złożona z 12 modułów. Dla tego wyrobu plan produkcji zakładał wyprodukowanie 300 szt. wyrobów w trakcie zmiany produkcyjnej, a granice stabilności procesu określono na 290–310 szt./zmianę. W tabeli 24 przedstawiono przewidywaną przez model SSN wielkość produkcji dla tych założeń.

Tabela 24. Przewidywana wielkość produkcji wiązek elektrycznych o 28 modułach i różnych umiejętnościach pracownika 3

Wejścia do sieci					Wyjście z sieci
Liczba modułów [szt.]	Umiejętności pracownika 1	Umiejętności pracownika 2	Umiejętności pracownika 3	Umiejętności pracownika 3	Przewidywana wielkość produkcji
12	4	4	4	3	308
12	4	4	3	3	288
12	4	4	2	3	225
12	4	4	1	3	162



Rys. 76. Przewidywana wielkość produkcji wiązek o 12 modułach i różnym poziomie umiejętności pracownika 3

Dane zawarte w tabeli 24, przedstawione w kontekście stabilności procesu, przedstawiono dodatkowo na rysunku 76.

Jak wynika z tabeli 24 i z rysunku 76 przy tych samych umiejętnościach pracowników, lecz zwiększonej liczbie modułów w wiązce elektrycznej, proces jest stabilny tylko wówczas, gdy wszyscy pracownicy gniazda montażu są doświadczeni, czyli pracują na tym stanowisku powyżej 4 tygodni. W przypadku gdy pracownik 3 jest zatrudniony na tym stanowisku poniżej 4 tygodni, proces przestaje być stabilny. Wyniki eksperymentu potwierdzają obserwacje i wcześniejsze przypuszczenia, iż tylko doświadczeni pracownicy (czyli pracujący na danym stanowisku powyżej 4 tygodni) są w stanie pracować zgodnie z ustalonym taktem, a liczba produkowanych przez nich braków spada do minimum.

Przykład 9

Zastosowanie modelu SSN w zapewnieniu stabilności procesu wydobywczego rudy miedzi

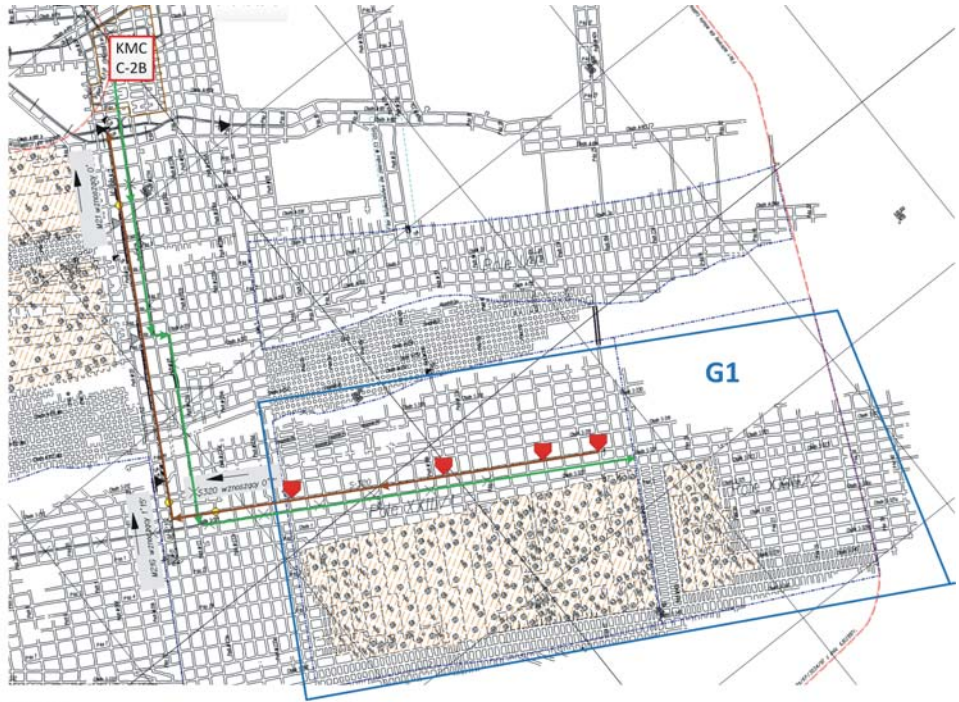
Kolejnym przykładem przedstawienia możliwości zastosowania modelu sztucznej sieci neuronowej w sterowaniu systemem produkcyjnym będzie proces wydobywania rudy miedzi. Procesy wydobywcze charakteryzują się dużą zmiennością i niepewnością ze względu na zmienne i nieprzewidywalne warunki otoczenia, przez co są małowstabilne, a sterowanie nimi jest bardzo trudne.

Celem budowy modelu SSN będzie zapewnienie odpowiedniego sterowania w procesie ładowania i odstawy rudy miedzi (tzw. urobku). Polegać ono będzie na odpowiednim doborze wartości parametrów wejść do procesu, aby wartości wyjść z procesu, czyli ilość wydobytego urobku, była zgodna z założonym planem produkcyjnym. Proces uznany będzie za stabilny, jeśli ilość wydobytego urobku, w założonym okresie, będzie odpowiadała ilości założonej w planie produkcji dla tego okresu.

Charakterystyka systemu produkcyjnego

Badania prowadzono w jednym z przedsiębiorstw górniczych, które mieści się na terenie Dolnego Śląska. Kopalnia, dla której została zbudowana sieć neuronowa zajmuje powierzchnię 158 km² pod ziemią, a wydobywanie odbywa się na głębokości 610–850 m. Do przeprowadzenia analiz wybrano jeden z oddziałów wydobywczych kopalni – oddział G-1. Oddział G-1 wydobywa rudę miedzi z dwóch pól wydobywczych XXIII/1 i XXIII/2. Maszyny pracujące na tym oddziale serwisowane są przez komorę maszyn ciężkich (KMC) C-2B. Na rysunku 77 przedstawiono fragment mapy kopalni z zaznaczonym obszarem oddziału G-1 drogami, po których poruszają się maszyny z komory maszyn ciężkich na pola wydobywcze oraz drogami, po których transportowana jest ruda miedzi.

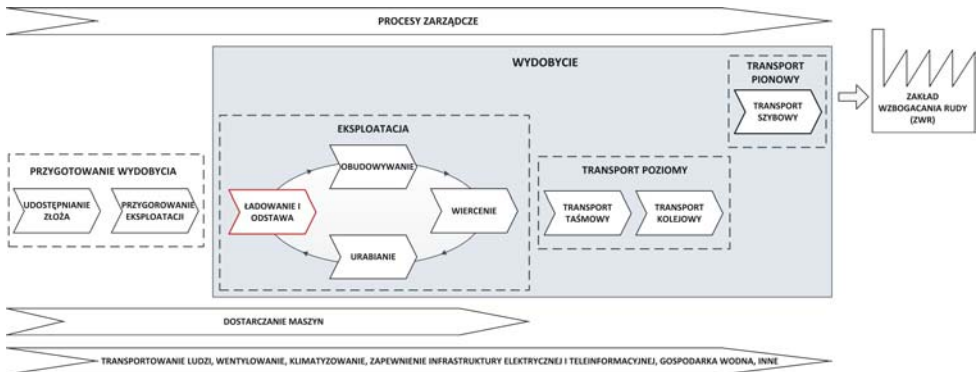
Celem systemu wydobywczego jest dostarczenie rudy miedzi do zakładu wzbogacania rudy (ZWR). Proces wydobywczy składa się z wielu podprocesów, co schematycznie przedstawiono na rysunku 78.



LEGENDA:

- Obszar oddziału górniczego G1
- Komora maszyn ciężkich C-2B
- Droga dojazdu maszyn z komory C-2B na pola wydobywcze oddziału G1
- Obszar oddziału górniczego G1
- ♥ Kraty na oddziale G1

Rys. 77. Schemat oddziału wydobywczego G1



Rys. 78. Schemat systemu wydobywczego

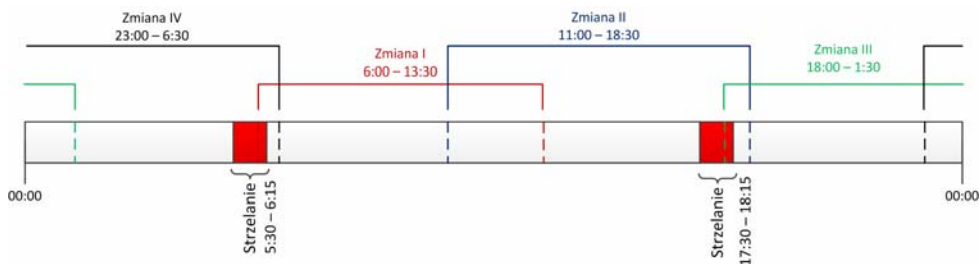
Proces eksploatacji jest głównym procesem w całym systemie wydobywczym. W procesie tym generowana jest wartość dodana i powstaje produkt (odpowiednio rozdrobniona ruda miedzi) dla klienta zewnętrznego, którym jest ZWR. Do systemu sterowania tym procesem, oprócz typowych elementów zarządczych, wchodzi również elementy wynikające z prawa górniczego związane z przebywaniem ludzi w niebezpiecznych warunkach naturalnych górotworu [28]. Sam proces odbywa się w wielu miejscach jednocześnie, na wielu polach wydobywczych w różnych ich częściach. Miejsce, w którym wykonywany jest proces eksploatacji, nazywa się przodkiem. Proces eksploatacji składa się z etapów opisanych dalej, które przebiegają cyklicznie.

Proces obudowywania polega na zabezpieczeniu wybranej przestrzeni za pomocą kotew zabezpieczających strop. Jego celem jest zabezpieczenie wybranej przestrzeni dla dalszych etapów procesu eksploatacji z udziałem ludzi i maszyn. Jeśli zawartość miedzi w złożu jest zbyt mała, to dalsza eksploatacja staje się nieopłacalna i wówczas wybrana przestrzeń ulega likwidacji przez tzw. zawał (naturalne zawalenie się górotworu) lub podsadzkę (wypełnienie wybranej przestrzeni piaskiem).

Celem procesu wiercenia jest wykonanie otworów strzałowych, do których założony zostanie materiał wybuchowy odpalony w podprocesie urabiania. Wiercenie wykonywane jest za pomocą tzw. samojezdnych wozów wiertniczych (SWW) i polega na wykonaniu otworów strzałowych w złożu. Następnie w wywiercone otwory strzałowe, za pomocą samojezdnych wozów strzelniczych (SWS), zakładany jest materiał wybuchowy.

Celem procesu ładowania i odstawy jest przewiezienie odstrzelonej rudy miedzi do punktu przesykowego (tzw. kraty). W procesie tym bierze zazwyczaj udział zestaw trzech maszyn: ładowarka kopalniana (ŁK) oraz dwa wozy odstawcze (WO).

Kolejne etapy procesu wydobywczego polegają na transporcie urobku, najpierw za pomocą przenośników taśmowych, a następnie transportem szynowym do tzw. skipu, czyli szybu wydobywczego, którym urobek transportowany jest na powierzchnię, skąd trafi do ZWR. Pomiędzy kolejnymi etapami w procesie transportu występują tzw. punkty przesykowe, wagi urobku i zbiorniki retencyjne. Zbiorniki retencyjne stanowią bufory zabezpieczające proces dostarczania rudy do ZWR przed zakłóceniami i są odpowiednikami magazynów w typowych procesach produkcyjnych.

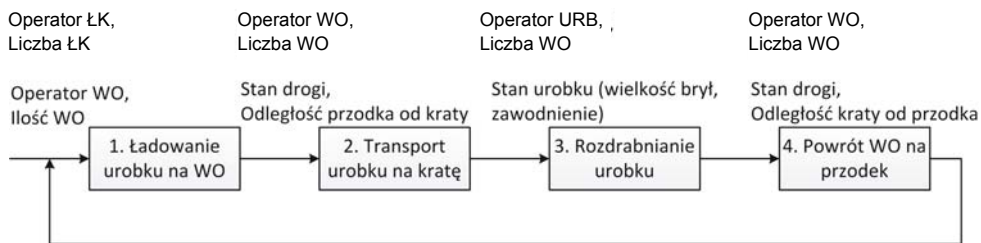


Rys. 79. Rozkład zmian roboczych w procesie eksploatacji

Praca w kopalni odbywa się na czterech zmianach roboczych, których rozkład przedstawiono na rysunku 79. Poszczególne zmiany robocze „zachodzą na siebie”. Jest to podyktowane koniecznością transportu ludzi szybami zjazdowymi, a następnie na miejsce wykonywania pracy.

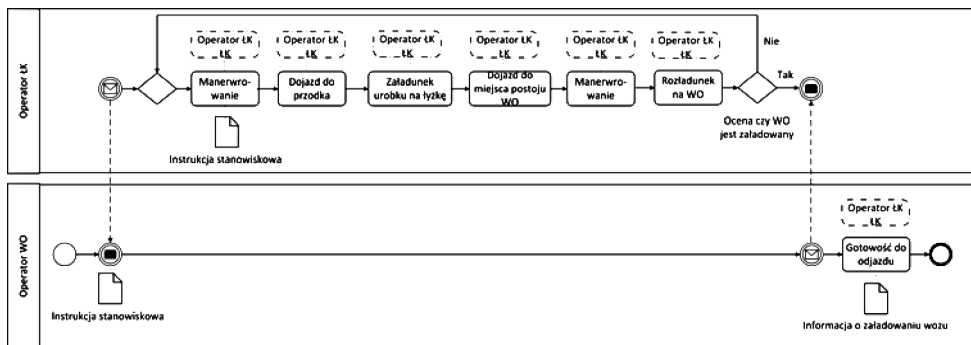
Charakterystyka procesu ładowania i odstawy

Do dalszej analizy i budowy modelu SSN wybrano jeden z etapów procesu eksploatacji – proces ładowania i odstawy zaznaczony na rysunku 78 kolorem czerwonym. Proces ten jest jednym z najważniejszych procesów w procesie eksploatacji. Jego celem jest przemieszczenie rudy z przodka do kraty, która jest punktem przesypu, czyli miejscem, gdzie ruda jest rozdrabniana i przesypywana na przenośnik taśmowy. Główne etapy tego procesu przedstawiono na rysunku 80.



Rys. 80. Główne etapy procesu ładowania i odstawy

1. Ładowanie urobku na WO. Wykonywany jest przez ŁK w przodka i polega na załadunku WO rudą miedzi. Na rysunku 81 przedstawiono model procesu ładowania WO zapisany w notacji BPMN.

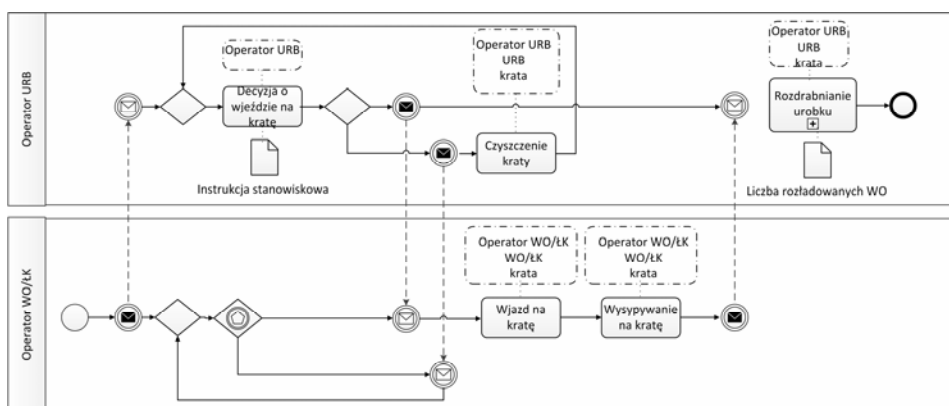


Rys. 81. Model ładowania WO w przodka zapisany w notacji BPMN

2. Transport rudy na kratę. Załadowany WO jedzie do punktu przesypowego (kraty). Transport urobku odbywa się po wyznaczonych drogach, przedstawionych

na rysunku 77. Drogi transportowe mogą mieć różny kąt nachylenia, a ich stan może być różny w zależności od rodzaju skał tworzących drogę. Jeśli skały są dość miękkie, to droga z czasem staje się błotnista i tworzą się w niej koleiny. W miarę upływu czasu transport po tego typu drodze staje się coraz trudniejszy, a przez to dłuższy.

3. Rozdrabnianie urobku na kracie. Krata znajduje się nad przenośnikiem taśmowym i jest punktem przesywowym, z którego rozpoczyna się transport rudy miedzi do ZWR. Jej rola polega na odpowiednim rozdrobnieniu urobku oraz zatrzymaniu wszelkich zanieczyszczeń, np. metalowych kotew, stempli i innych elementów, które mogłyby uszkodzić przenośnik taśmowy. Duże bryły skalne są na kracie kruszone za pomocą urządzenia do rozdrabniania skał (URB). Czas pracy URB zależy od wielkości przywiezionych skał oraz od stopnia zanieczyszczenia i zawodnienia urobku. Sposób rozładunku WO na kracie, zapisany w notacji BPMN (rys. 82).



Rys. 82. Model procesu rozładowywania WO na kracie zapisany w notacji BPMN

4. WO po rozładowaniu na kracie wraca na przodek do ponownego załadunku.

Elementami zakłócającymi proces ładowania i odstawy, oprócz awarii maszyn górniczych, są zmienne warunki otoczenia. Powodują one, że czas transportu urobku oraz czas powrotu WO z kraty na przodek jest bardzo różny.

Sposób budowy sieci neuronowej

Celem budowy modelu SSN będzie zapewnienie takiego sterowania procesem ładowania i odstawy, aby proces pozostawał stabilny w założonym okresie. Sterowanie polegać będzie na odpowiednim doborze wartości parametrów wejść do procesu, aby wartość wyjścia, czyli wielkość wydobywania, była zgodna z założonym planem produkcyjnym. Proces pozostanie stabilny, jeśli wielkość wydobywania będzie zgodna z wielkością zaplanowaną w planie produkcji.

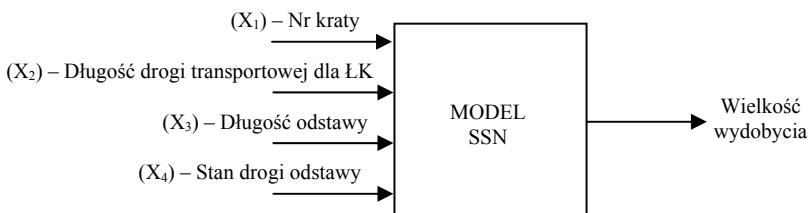
Aby proces eksploatacji można było uznać za stabilny, powinien on dostarczać ustaloną ilość rudy miedzi do ZWR-ów. Ponieważ WO ma stałą i określoną po-

jemność 20 t, to ilość rudy trafiająca do zakładów przeróbki zależy od liczby rozładowanych wozów na kracie. Im czas procesu ładowania i odstawy będzie krótszy, tym więcej WO można rozładować na kracie w trakcie zmiany roboczej. Czas procesu ładowania i odstawy zależy od wielu czynników. Należą do nich m.in. liczba awarii WO i ŁK, zawodnienie i zanieczyszczenie urobku, długość drogi odstawy (odległość między przodkiem a kratą), odległość między miejscem postoju WO a miejscem, z którego ładowana jest ruda miedzi po strzeleniu, umiejętności operatorów WO, ŁK i URB oraz inne czynniki związane z naturalnym środowiskiem górotworu.

W trakcie obserwacji i pomiarów czasu czynności w procesie ładowania i odstawy stwierdzono, że największy wpływ na czas trwania procesu i zarazem na liczba kursów wykonanych przez operatorów WO mają:

- Długość drogi odstawy od przodka do kraty. Na analizowanym oddziale G-1 znajdują się 4 kraty.
- Długość drogi pokonywanej przez ŁK podczas ładowania WO. Wozy ładowane są w komorach, czyli miejscach skrzyżowania korytarzy pomiędzy filarami. Droga ta może wynosić 3–30 m.
- Stan dróg odstawy, na który wpływa rodzaj skał na spągu, kąt nachylenia i stan zawodnienia. Ciężki transport kołowy powoduje, że po pewnym czasie tworzą się koleiny, a warstwa błota sięga nawet 80 cm.

Parametry te, oraz numer kraty, wybrano jako zmienne objaśniające podczas budowy modelu SSN (rys. 83).



Rys. 83. Zmienne objaśniające i zmienna celu (objaśniana) wykorzystane do budowy SSN

W celu prognozowania ilości wydobytej rudy w procesie ładowania i odstawy w oddziale G1, przy zadanych wartościach wejściowych, zbudowano jednokierunkową sieć neuronową typu perceptron. Za zbiór danych uczących posłużyły wyniki obserwacji i pomiary czasów w procesie ładowania i odstawy. W sumie dokonano 211 pomiarów w ciągu 20 dni na 3 zmianach roboczych. Pomiarów dokonywali sztygarzy zmianowi na specjalnie do tego celu przygotowanych formularzach. Dla stanu drogi wprowadzono cztery wartości:

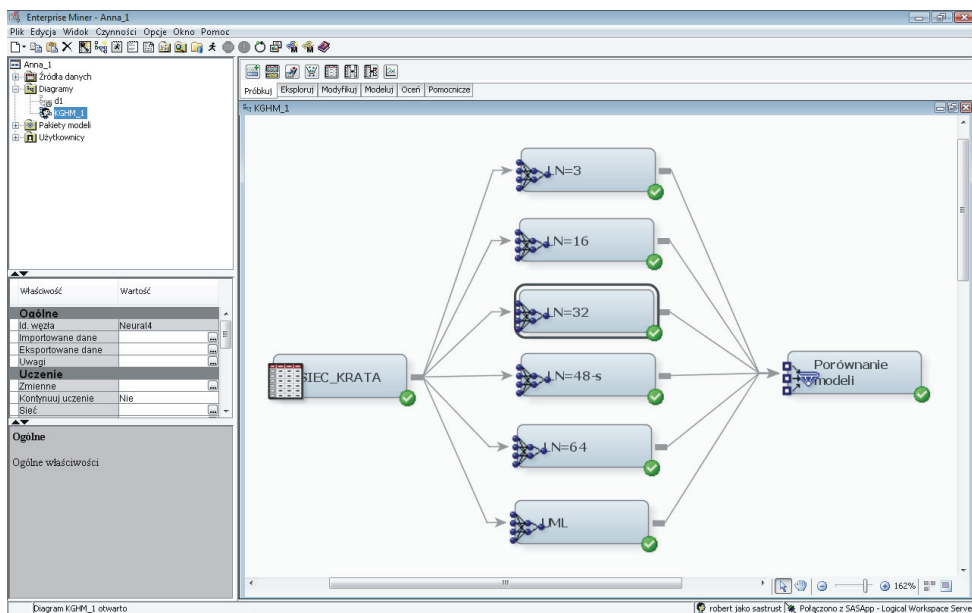
- 1 – przewaga drogi równej i suchej,
- 2 – przewaga drogi równej i mokrej,
- 3 – przewaga drogi nierównej i suchej,
- 4 – przewaga drogi nierównej i mokrej.

Podobnie jak w przykładzie 8, eksperyment wykonano w środowisku SAS Enterprise Miner 6.2. Pierwszym krokiem było zbadanie korelacji między zmiennymi objaśniającymi a zmienną objaśnianą. Wyniki zawierające wartość korelacji przedstawione są w tabeli 25.

Tabela 25. Wartości korelacji pomiędzy zmiennymi

Atrybut (zmienna) objaśniający	Wartość korelacji
Nr kraty	-0,06787
Długość drogi transportowej dla ŁK	0,01009
Długość drogi dostawy dla WO	-0,32767
Stan drogi	-0,07535

Również w tym przypadku otrzymane wyniki wskazują, że do analizowanego problemu nie ma sensu używać metody regresji liniowej (wartości bezwzględne korelacji są poniżej 0,5). Uzasadnione jest zatem skorzystanie z sieci neuronowych, które budują modele regresyjne nieliniowe.



Rys. 84. Środowisko SAS Enterprise Miner 6.2 wraz z badanymi modelami sieci neuronowych i ich porównaniem

W dalszych eksperymentach zbudowano model sieci neuronowej typu wielowarstwowy perceptron, dla którego zmieniano liczbę neuronów w warstwie ukrytej. W celu potwierdzenia wyników analizy korelacji zbudowano również sieć neuronową typu uogólniony model liniowy. Na rysunku 84 przedstawiono zrzut ekranowy z programu SAS Enterprise Minet 6.2 ze zbudowanymi modelami.

Dla zbudowanych modeli sieci neuronowych wykonano wiele eksperymentów dla różnej liczby zmiennych objaśniających. Ich celem było ustalenie, dla jakiej kombinacji zmiennych objaśniających sieć neuronowa będzie najlepiej wyznaczała wartość wydobywania. Podczas budowy modeli uwzględniono różne liczby zmiennych objaśniających. Ich wybór był podyktowany wcześniejszymi eksperymentami, czyli zależał od wartości bezwzględnej korelacji (tab. 25). W eksperymencie nr 1 wykorzystane są wszystkie atrybuty wejściowe, w eksperymencie nr 2 zrezygnowano z „długości drogi transportowej dla ŁK” (najmniejsza wartość bezwzględna korelacji), w eksperymencie nr 3 zrezygnowano dodatkowo z „numeru kraty” (kolejna najmniejsza wartość bezwzględna korelacji). Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 26, gdzie uzyskane wartości przedstawiają kryterium wyboru sieci, którym jest przeciętny błąd kwadratowy. Uzyskane wyniki dotyczą analizy wejściowego zbioru danych, który posłużył też do procesu uczenia sieci.

Tabela 26. Wyniki eksperymentów z sieci neuronowej

Model sieci neuronowej	Przeciętny błąd kwadratowy		
	Eksperyment nr 1	Eksperyment nr 2	Eksperyment nr 3
WWP – LN=3	1228.59	1643,71	2375,39
WWP – LN=16	1072.43	1369,98	1851,50
WWP – LN=32	427.08	866,69	1033,93
WWP – LN=48	327.15	764,22	1019,25
WWP – LN=64	348.80	772,59	999,05
UML	2440.74	2450,18	2537,86

Gdzie WWP – sieć typu wielowarstwowy perceptron,

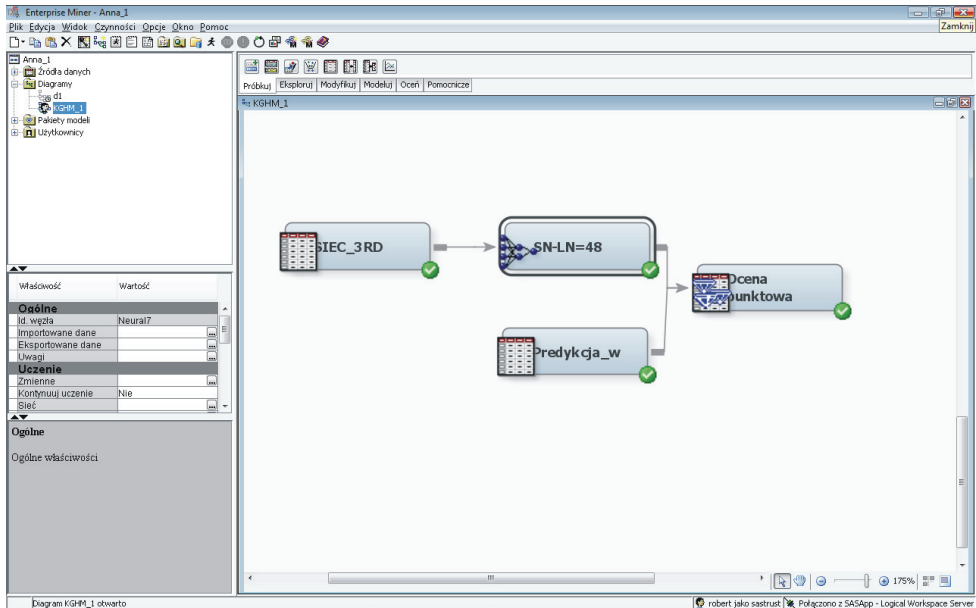
LN – liczba neuronów w warstwie ukrytej,

UML – uogólniony model liniowy.

Analiza wyników potwierdza, że do tego problemu nie nadają się modele liniowe. Dla każdego eksperymentu najgorsze wyniki (o największym przeciętnym błędzie kwadratowym) uzyskano dla sieci neuronowej typu uogólniony model liniowy. Najlepsze wyniki uzyskano dla sieci typu wielowarstwowy perceptron z 48 neuronami dla eksperymentu 1. Ten model sieci neuronowej został użyty do dalszych eksperymentów.

Określenie stabilności dla procesu ładowania i odstawy przy sieci neuronowej o 48 neuronach w warstwie ukrytej

Wybrany model sieci neuronowej został wykorzystany do określania stabilności procesu wydobywania rudy w oddziale G1. W tym celu przygotowano dane testowe oraz skorzystano z węzła „ocena punktowa” środowiska SAS Enterprise Miner 6.2 (rys. 85).



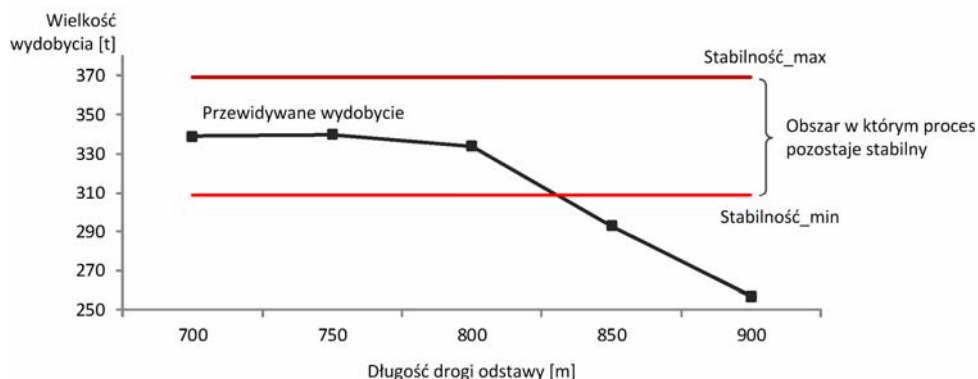
Rys. 85. Wykorzystanie węzła „ocena punktowa” w celu przewidywania wydobywania rudy

Dane testowe zawierają różne warianty zmiany atrybutów wejściowych (zmiennych objaśniających). Dla tych danych wybrany model sieci neuronowej przewiduje wartości wydobywania, które są interpretowane w kontekście stabilności procesu wydobywania. Przykładowe dane testowe, wraz z przewidywaną wielkością wydobywania, przedstawione są w tabeli 27–29. Wielkość planowanego wydobywania ustalono na 330 t. W badaniach przyjęto, że **wydobycie jest stabilne, jeżeli wartość bezwzględna jego zmiany nie przekracza 20 ton**. Odpowiada to wartości wyładunku dwóch wozów odstawczych na zmianę. W tabeli 27 przedstawiono przewidywaną przez model SSN wielkość wydobywania w zależności od długości drogi transportowej.

Dane zawarte w tabeli 27, przedstawione w kontekście stabilności procesu przedstawiono dodatkowo na rysunku 86.

Tabela 27. Przewidywane wydobycie dla kraty nr 4 przy zmieniającej się długości dróg odstawy

Wejścia do sieci				Wyjście z sieci
Nr kraty	Droga ŁK [m]	Droga WO [m]	Stan drogi	przewidywane wydobycie [t]
4	50	700	4	339
4	50	750	4	340
4	50	800	4	334
4	50	850	4	293
4	50	900	4	257

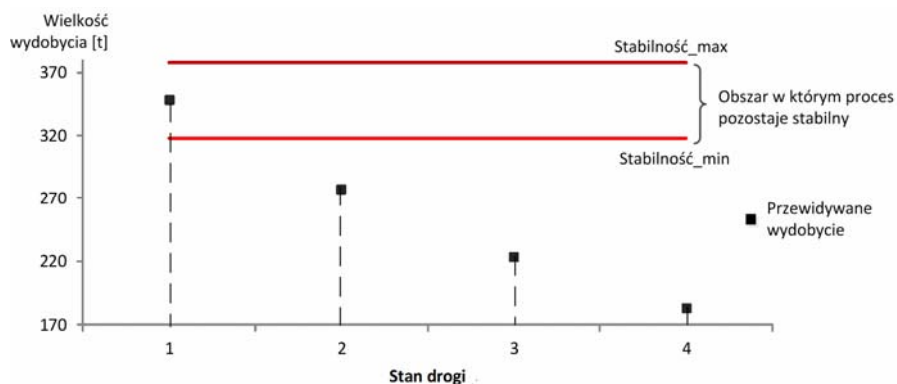


Rys. 86. Przewidywana wielkość wydobycia dla kraty nr 4 dla zmieniającej się długości drogi odstawy

Jak wynika z tabeli 27 i rysunku 86 proces wytrącany jest ze stanu równowagi, jeśli droga odstawy wydłuży się do 850 m. Przy tej długości nie ma możliwości wykonania założonego planu produkcji. Jest to sygnał dla podejmującego decyzji, że należy zmienić wartości parametrów zmiennych wejściowych, np. należy poprawić stan dróg. W tabeli 28 przedstawiono przewidywaną przez model SSN wielkość wydobycia w zależności od stanu dróg odstawy. Dane przedstawione w tabeli 28 dodatkowo ilustruje w kontekście stabilności procesu produkcyjnego pokazano na rysunku 87.

Tabela 28. Przewidywanie wydobycie dla kraty nr 3 przy zmieniającym się stanie dróg

Nr kraty	Droga ŁK [m]	Droga WO [m]	Stan drogi	Przewidywane wydobycie [t]
3	60	1000	1	348
3	60	1000	2	277
3	60	1000	3	223
3	60	1000	4	183

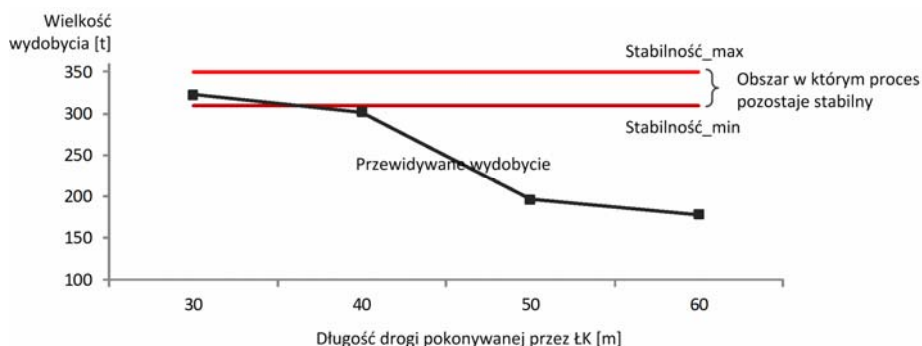


Rys. 87. Przewidywana wielkość wydobywania dla kraty nr 3 przy zmieniającym się stanie dróg odstawy

Jak wynika z tabeli 28 i z rysunku 87, przy założonych długościach drogi odstawy i długości drogi pokonywanej przez ŁK podczas ładowania WO, proces pozostanie stabilny tylko przy drodze odstawy równej i suchej. W pozostałych przypadkach nie ma możliwości wykonania założonego planu wydobywania bez zmiany wartości innych parametrów wejściowych. W tabeli 29 przedstawiono przewidywaną przez model SSN wielkość wydobywania w zależności od długości drogi transportowej pokonywanej przez ŁK w trakcie ładowania WO.

Tabela 29. Przewidywanie wydobywania dla kraty nr 4 przy zmieniającej się długości drogi transportowej dla koparko-ładowarki wozów odstawczych

Nr kraty	Droga ŁK [m]	Droga WO [m]	Stan drogi	przewidywane wydobywanie [t]
4	30	1200	3	323
4	40	1200	3	302
4	50	1200	3	196
4	60	1200	3	178



Rys. 88. Przewidywana wielkość wydobywania dla kraty nr 4 dla zmieniającej się długości drogi ŁK

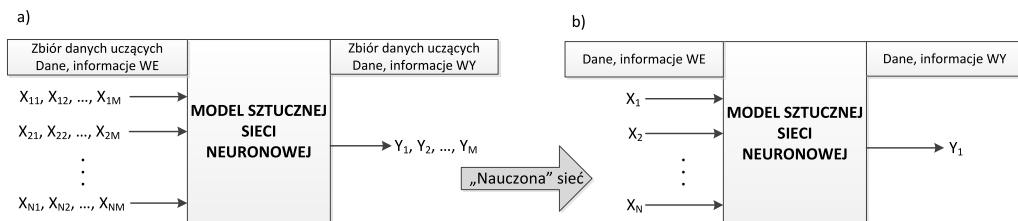
Rysunek 88 ilustruje dane z tabeli 29 w kontekście stabilności procesu ładowania i odstawy, czyli zaplanowanej wielkości wydobywania wynoszącej 330 ± 20 t w zależności od długości drogi pokonywanej przez ŁK.

Jak wynika z tabeli 29 i rysunku 88, proces pozostanie stabilny, po zadanych wartościach tylko wówczas, jeśli droga pokonywana przez ŁK podczas ładowania WO nie będzie dłuższa niż 30 m. W przeciwnym przypadku, aby zrealizować założony plan wydobywania, należy zmienić wartości pozostałych parametrów wejściowych (zmiennych objaśniających).

5.5. WNIOSKI

Rozwój systemów informatycznych doprowadził do wzrostu informacji, jakie są gromadzone w przedsiębiorstwach. Z kolei wymagania rynku oraz dynamika otoczenia przedsiębiorstw doprowadziły do poszukiwania nowych, szybszych metod modelowania systemów produkcyjnych. Jedną z nich są modele sztucznych sieci neuronowych, które dostarczają rozwiązań z uwzględnieniem procesu uczenia się na podstawie dostępnych danych. Natomiast umożliwiają one pominięcie etapu modelowania złożonych relacji między elementami systemu produkcyjnego. Do budowy modelu systemu produkcyjnego wystarcza jedynie zdefiniowany problem, wybór zmiennych wejściowych i wyjściowych oraz tzw. zbiór danych uczących.

Powodem stosowania SSN w nauce i technice jest możliwość traktowania dynamicznych, złożonych, często o skomplikowanej naturze, lub określonych nieprecyzyjnie procesów jako „czarnej skrzynki”. Innymi słowy, SNN ułatwia znalezienie związku między wieloma zmiennymi wejściowymi do procesu a zmienną wyjściową bez konieczności budowania skomplikowanych równań matematycznych. Na rysunku 89 przedstawiono zestawienie danych wejściowych i wyjściowych wykorzystywanych w modelach SSN.



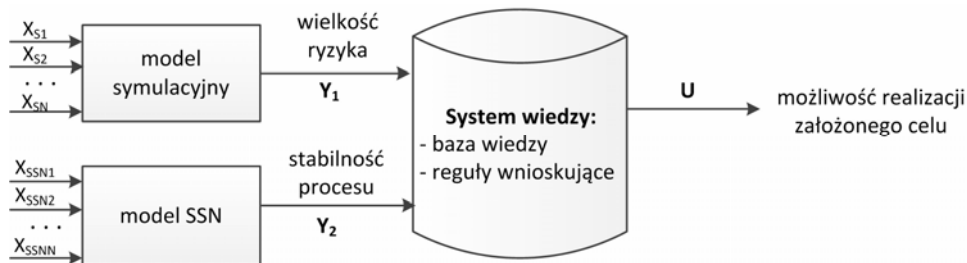
Rys. 89. Zestawienie danych wejściowych i wyjściowych w modelach sztucznych sieci neuronowych: a) uczenie sieci, b) przeprowadzanie eksperymentów

Modele sztucznych sieci neuronowych oraz symulacyjne, przedstawione w rozdziale 3, mogą być stosowane do sterowania systemem produkcyjnym, a przez to do zapewnienia jego stabilności. Obydwa rodzaje modeli mają wiele zalet, ale też i wady. W ujęciu, zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych korzystne byłoby połączenie obydwu typów modeli. Nie umożliwia to jednak odmiennego sposobu ich budowy oraz innych rodzajów danych wejściowych i wyjściowych, co przedstawiono na rysunku 56 i 89. Dlatego w następnym rozdziale proponuje się koncepcję fuzji obydwu typów modeli przez budowę modelu hybrydowego łączącego model symulacyjny z modelem SSN przez bazę wiedzy eksperckiej i wnioskowanie rozmyte. Implementacja tak opracowanego systemu ekspertowego w systemie produkcyjnym powinna ułatwiać ocenę realizacji planów produkcyjnych w warunkach losowo pojawiających się czynników ryzyka.

6. MODEL HYBRYDOWY SYSTEMU EKSPERTOWEGO DO OCENY MOŻLIWOŚCI REALIZACJI ZAŁOŻONYCH CELÓW PRODUKCYJNYCH

W rozdziale zaproponowano koncepcję połączenia modeli symulacyjnych i modeli SSN przez budowę hybrydowego systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonych celów produkcyjnych. Przedstawiono krótką charakterystykę rozmytych systemów ekspertowych oraz algorytmu ich budowy. Do weryfikacji koncepcji posłużył przykład procesu produkcji wiązek elektrycznych. Dla tego przykładu zbudowano system ekspertowy wykorzystujący wnioskowanie rozmyte do oceny możliwości realizacji założonej w planie produkcyjnym ilości produkcji wiązek elektrycznych. Na potrzeby proponowanego systemu zdefiniowano funkcje przynależności zmiennych lingwistycznych oraz zbudowano bazę reguł decyzyjnych. Funkcjonowanie systemu przetestowano w specjalistycznym oprogramowaniu Matlab z Fuzzy Logic Toolbox.

Duże korzyści w analizie i zapewnieniu stabilności systemów produkcyjnych przyniosłoby połączenie modelowania symulacyjnego i sztucznych sieci neuronowych. Na proste połączenie obydwu metod nie pozwala jednak ich odmienna budowa, specyfika, różne cele budowy obydwu modeli oraz inne rodzaje danych wejściowych i wyjściowych. Dlatego proponuje się koncepcję fuzji obydwu typów modeli przez bazę wiedzy eksperckiej i wnioskowanie rozmyte. W wyniku tego powstałby model hybrydowy umożliwiający ocenę możliwości realizacji celu stawianego przed nowo projektowanym lub istniejącym



Rys. 90. Koncepcja budowy modelu systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji celu w zależności od wielkości ryzyka i poziomu stabilności systemu produkcyjnego

systemem produkcyjnym. Na rysunku 90 przedstawiono koncepcję budowy proponowanego modelu hybrydowego do oceny możliwości realizacji założonego celu.

Wyniki z modelu symulacyjnego, jak i z modelu SNN, służyć będą pozyskaniu wiedzy na temat analizowanego systemu produkcyjnego. Proponuje się, aby wyjście z modelu symulacyjnego dostarczało wiedzy na temat wielkości ryzyka, natomiast wyjście z modelu SNN wiedzy na temat stabilności procesu.

6.1. WPROWADZENIE DO ROZMYTYCH SYSTEMÓW EKSPERTOWYCH

Głównymi elementami systemu ekspertowego jest baza wiedzy (ang. *Knowledge Base*) i reguły wnioskowania (ang. *Inference Engine*). Baza wiedzy jest realizacją komputerową szczegółowego zbioru logicznie powiązanych danych dotyczących danej dziedziny. Są to reguły i fakty zapisane w określonym języku reprezentacji wiedzy [23]. Wiedza o obiekcie analizy i podejmowaniu decyzji jest formułowana przez eksperta w danej dziedzinie i może przybierać postać wzorów matematycznych. Jednak bardzo często jest formułowana w postaci zdań określających różne rodzaje właściwości i zależności występujące w analizowanym systemie.

Aby rezultat pracy systemu ekspertowego był poprawny, muszą zostać zastosowane również reguły poprawnego rozumowania, które formułuje logika. Najczęściej są to reguły wnioskowania podające, jak wyciągnąć poprawny wniosek na podstawie przesłanek, które uznaje się za prawdziwe [23]. Jeśli zestaw tych zdań jest odpowiednio precyzyjny i spełnia określone reguły, to można go traktować jako reprezentację wiedzy o rozpatrywanym systemie [18, 23]. W większości wypadków formy reprezentacji wiedzy mają postać regułową: „IF warunek THEN konkluzja”, ale mogą również przybierać postać drzew decyzyjnych lub tablic decyzyjnych.

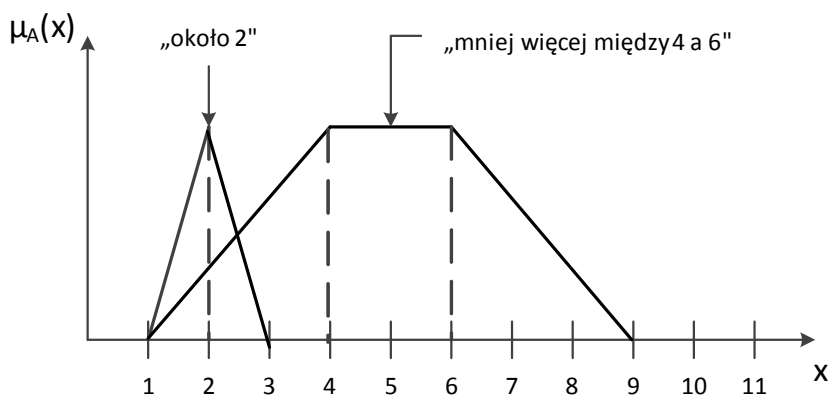
Za integralną część systemu ekspertowego przyjmuje się również interfejs użytkownika, zawierający procedury wejścia–wyjścia i umożliwiający formułowanie pytań oraz przekazywanie rozwiązania przez program. Ponieważ jednak w pracy proponowany jest jedynie model systemu ekspertowego, to do zaimplementowania reguł wnioskowania rozmytego wykorzystane zostanie oprogramowanie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox.

W koncepcji budowy modelu systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji celu (planu produkcji) w zależności od wielkości ryzyka i poziomu stabilności systemu produkcyjnego proponuje się zastosowanie wnioskowania rozmytego. Wnioskowanie rozmyte charakteryzuje się systemem wiedzy w postaci rozmytych reguł „jeżeli ..., to ...” i znajduje zastosowanie w modelowaniu w sytuacji, gdy trudno zapisać matematycznie zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi i objaśnianymi

(wejściowymi i wyjściowymi), a jednocześnie dysponuje się wiedzą o odpowiadających sobie wartościach wejść i wyjść. Analizowany problem – możliwość realizacji planów produkcyjnych w zależności od wielkości ryzyka i poziomu stabilności systemu produkcyjnego – jest trudny do zamodelowania matematycznego, jednak na podstawie analizy danych, pochodzących z modelu symulacyjnego i modelu SSN, można uzyskać informacje dotyczące zależności odpowiadających sobie wartości wejściowych i wyjściowych.

W dziedzinie systemów produkcyjnych zbiory rozmyte znajdują zastosowania w obszarach takich, jak [7, 18, 67, 101, 105, 145, 183, 188]:

- regulacja oparta na sterowaniu rozmytym w urządzeniach automatyki przemysłowej, szczególnie w przypadku układów o zmiennych parametrach,
- diagnozowanie maszyn i układów elektrycznych przez łatwe wyróżnianie różnego rodzaju cech sygnałów i określanie ich wartości w celu zidentyfikowania i porównania do reprezentanta klasy,
- planowanie, harmonogramowanie, dobór strategii działania oraz sterowanie elastycznych zautomatyzowanych systemów produkcyjnych,
- dobór parametrów i sterowanie procesami przemysłowymi,
- modelowanie układów mechanicznych, szczególnie w zakresie badania istotności uproszczeń i relacji między członami modelu empirycznego a układu fizycznego.
- logika rozmyta jest zbudowana na wiedzy ekspertów: opiera się ona na *know-how* tych, którzy rozumieją jak dany system ma działać. Dodatkową zaletą jest to, że pojęcia matematyczne zastosowane w rozumowaniu rozmytym są bardzo proste, a przez to będą mogły być stosowane przez osoby z różnych szczebli organizacji.



Rys. 91. Funkcje przynależności dla liczby rozmytej trójkątnej („około 2”) i trapezoidalnej („mniej więcej między 4 i 6”)

Podstawowym elementem wnioskowania rozmytego jest pojęcie zmiennej lingwistycznej (np. „możliwość realizacji planu”), która przyjmuje wartości lingwistyczne, takie jak „duża”, „mała”. Wartości przyjmowane przez zmienne lingwistyczne są następnie reprezentowane przez tzw. funkcje przynależności [75]. W praktyce dokonuje się uproszczenia polegającego na założeniu, że liczby rozmyte przyjmują postać trójkąta lub trapezu, których funkcje przynależności pokazano na rysunku 91.

Jednym z podstawowych środków umożliwiających przedstawienie zależności między przyjętymi zmiennymi lingwistycznymi są rozmyte zdania warunkowe. Ułatwiają one opisanie zależności przyczynowo-skutkowych. Najczęściej stosowana jest architektura Mamdaniego, w której na podstawie wiedzy eksperta tworzy się bazę reguł. Zdania te nazywane są też rozmytymi regułami wnioskowania typu [46]:

Jeśli „rozmyta przesłanka logiczna”, **to** „rozmyta konkluzja”.

Metoda Mamdaniego jest przydatna, gdy liczba zmiennych jest mała. W przeciwnym razie napotka się następujące trudności [213]:

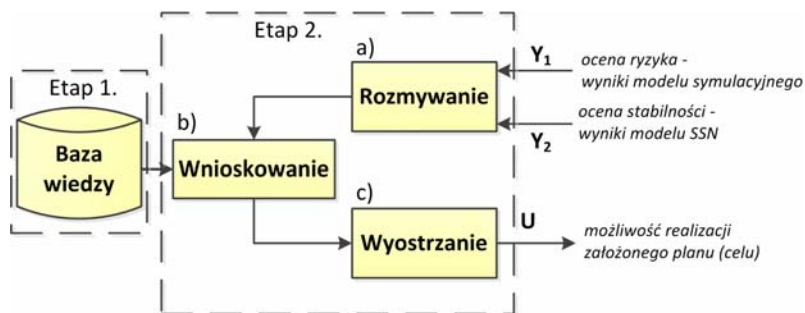
- liczba reguł rośnie wykładniczo wraz z liczbą zmiennych w przesłance,
- im więcej reguł, tym trudniej ocenić ich dopasowanie do problemu,
- jeżeli liczba zmiennych w przesłance jest zbyt duża, trudno będzie zrozumieć relacje między przesłankami i konsekwencjami.

Reguły tego typu są szeroko rozpowszechnione w codziennych wyrażeniach języka naturalnego. Najważniejszym zadaniem jest ich pozyskanie i rozwiązanie problemu. Zazwyczaj zadania te należą do eksperta z danej dziedziny, który konstruuje reguły oraz dobiera funkcje przynależności dla przesłanek i konkluzji w każdym rozważanym przypadku [46]. Szczegółowe definicje zbiorów rozmytych, jak również wiadomości dotyczące operacji na tych zbiorach i informacje na temat logiki rozmytej, można znaleźć w wymienionych wcześniej pracach, a także [75, 110].

6.2. BUDOWA MODELU SYSTEMU EKSPERTOWEGO DO OCENY MOŻLIWOŚCI REALIZACJI PLANU PRODUKCJI W ZALEŻNOŚCI OD WIELKOŚCI RYZYKA I POZIOMU STABILNOŚCI SYSTEMU PRODUKCYJNEGO

Do potrzeb budowy modelu rozmytego systemu hybrydowego wykorzystano algorytm składający się z dwóch etapów, który przedstawiono na rysunku 92.

Etap 1. Budowanie bazy wiedzy, która będzie przechowywała zbiór reguł IF-THEN **dostarczonych** przez ekspertów, czyli sformalizowaną wiedzę na temat rozwiązywanego problemu.



Rys. 92. Algorytm budowy modelu rozmytego systemu hybrydowego

Etap 2. Składa się z następujących trzech kroków:

a) Rozmywanie (ang. *fuzzification*) polegające na przekształceniu wejść systemu, którymi są ostre wartości (liczbowe) do wartości rozmytych.

b) Wybór i wykorzystanie mechanizmu wnioskowania, który symuluje ludzkie rozumowanie przez proces wnioskowania rozmytego na wejściach zgodnie z logiką zapisaną w regułach IF-THEN.

c) Wyostrażanie (ang. *defuzzification*) polegające na przekształceniu zbioru rozmytego powstałego w wyniku wnioskowania na wartości ostre.

Baza wiedzy (Etap 1) budowana jest indywidualnie i jednorazowo dla systemu produkcyjnego, dla którego oceniana będzie możliwość realizacji planu produkcji w zależności od występującego w nim wielkości ryzyka i poziomu stabilności. Etap 2 odpowiada za działanie systemu ekspertowego i może być powtarzany wielokrotnie. Podawane wartości na temat wielkości ryzyka i poziomu stabilności analizowanego systemu produkcyjnego są w krokach a, b, i c przekształcane na wartość wyjściową określającą możliwość realizacji założonego planu produkcji.

Za przykład budowy modelu rozmytego systemu hybrydowego do oceny możliwości realizacji planu produkcji w zależności od wielkości ryzyka i poziomu stabilności systemu produkcyjnego posłuży system produkcyjny wiązek elektrycznych, dla którego prezentowano już następujące obszary zastosowań modelowania w zapewnianiu stabilności systemów produkcyjnych:

- modelowania i symulacji w reorganizacji linii produkcyjnej (przykł. 5, rozdz. 3),
- oceny ryzyka reorganizowanego systemu produkcyjnego (przykł. 7, rozdz. 4),
- zastosowania modelu SSN (przykł. 8, rozdz. 5).

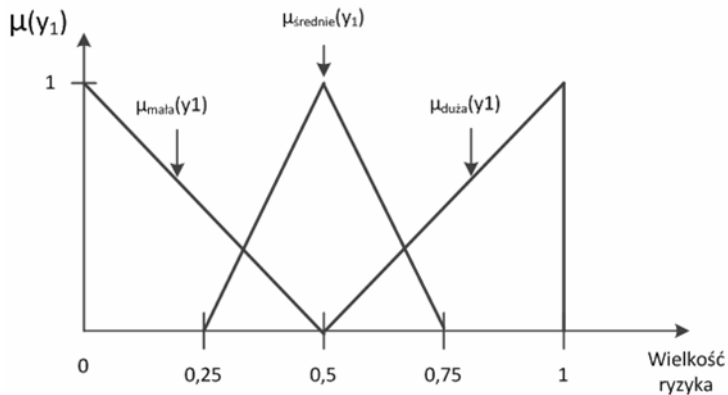
Przykład 10

Budowa modelu hybrydowego systemu ekspertowego do oceny możliwości produkcji założonej liczby wiązek elektrycznych

Na potrzeby budowy hybrydowego modelu rozmytego ustalono następujące zmienne lingwistyczne:

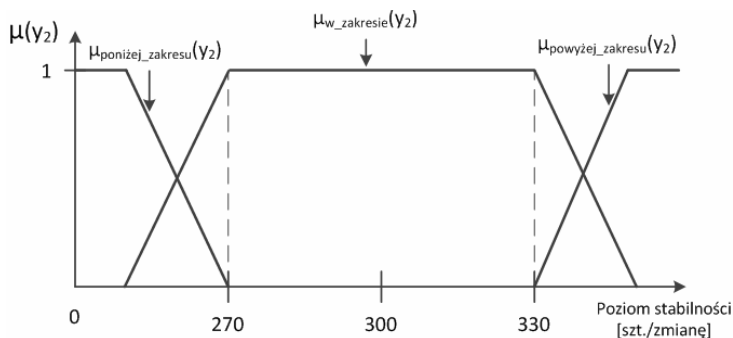
- wielkość ryzyka = ,
- poziom stabilności,
- możliwość realizacji planu (celu).

Dla podanych określonych zmiennych zdefiniowano ich funkcje przynależności. Na rysunku 93 przedstawiono funkcję przynależności dla zmiennej lingwistycznej „wielkość ryzyka”.



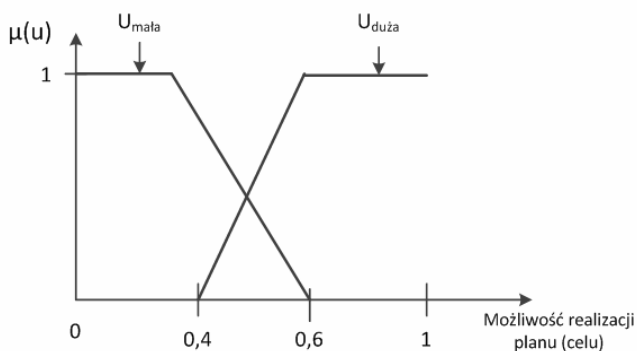
Rys. 93. Funkcja przynależności dla zmiennej lingwistycznej „wielkość ryzyka”

Dla zmiennej lingwistycznej „wielkość ryzyka” proponowana funkcja przynależności jest uniwersalna i może być przyjęta dla wszystkich badanych systemów produkcyjnych. Na rysunku 94 przedstawiono funkcję przynależności dla zmiennej lingwistycznej „poziom stabilności” przyjętego programu produkcji wiązki elektrycznej o 9–12 modułach.



Rys. 94. Funkcja przynależności dla zmiennej lingwistycznej „poziom stabilności” w procesie produkcji wiązki elektrycznej złożonej z 9–12 modułów

Na rysunku 95 przedstawiono funkcję przynależności dla zmiennej lingwistycznej „możliwość realizacji planu (celu)”.



Rys. 95. Funkcja przynależności dla zmiennej lingwistycznej „możliwość realizacji planu (celu)”

Tak jak w przypadku zmiennej lingwistycznej „wielkość ryzyka”, proponowana funkcja przynależności dla zmiennej lingwistycznej „możliwość realizacji planu (celu)”, jest uniwersalna i może być przyjęta dla wszystkich badanych systemów produkcyjnych.

Etap 1. Budowanie bazy wiedzy

Następnie zbudowano bazę reguł opisujących relacje między poszczególnymi wartościami zmiennych, tzn. opisujących możliwość realizacji planu produkcji w zależności od wielkości ryzyka występującego w systemie produkcyjnym i od poziomu jego stabilności.

- Jeżeli *WR* mała oraz *PS* powyżej zakresu, to *RC* duża.
- Jeżeli *WR* mała oraz *PS* w zakresie, to *RC* duża.
- Jeżeli *WR* mała oraz *PS* poniżej zakresu, to *RC* mała.
- Jeżeli *WR* średnia oraz *PS* powyżej zakresu, to *RC* duża.
- Jeżeli *WR* średnia oraz *PS* w zakresie, to *RC* mała.
- Jeżeli *WR* średnia oraz *PS* poniżej zakresu, to *RC* mała.
- Jeżeli *WR* duża oraz *PS* powyżej zakresu, to *RC* mała.
- Jeżeli *WR* duża oraz *PS* w zakresie, to *RC* mała.
- Jeżeli *WR* duża oraz *PS* poniżej zakresu, to *RC* mała.

Gdzie: *WR* – wartość ryzyka, *PS* – poziom stabilności, *RC* – możliwość realizacji celu.

Bazę reguł decyzyjnych można przedstawić również w postaci tablicy decyzyjnej, co prezentuje tabela 30.

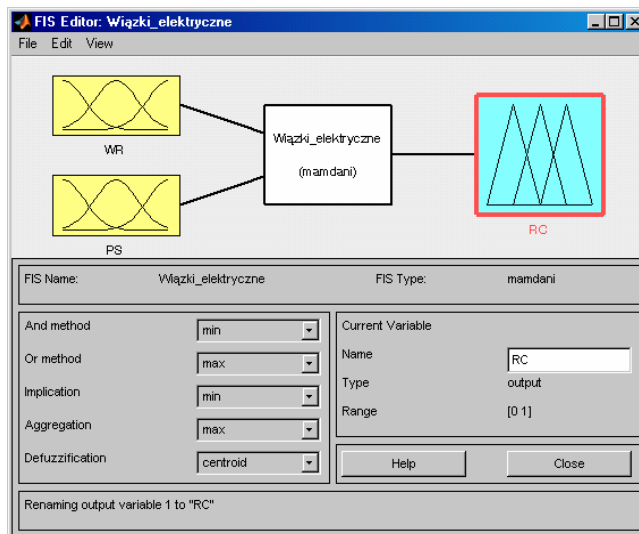
Tabela 30. Tablica decyzyjna bazy reguł

Y_1/Y_2	Poniżej zakresu	W zakresie	Powyżej zakresu
Mała	mała	duża	duża
Średnia	mała	mała	duża
Duża	mała	mała	mała

Etap 2. Funkcjonowanie systemu ekspertowego

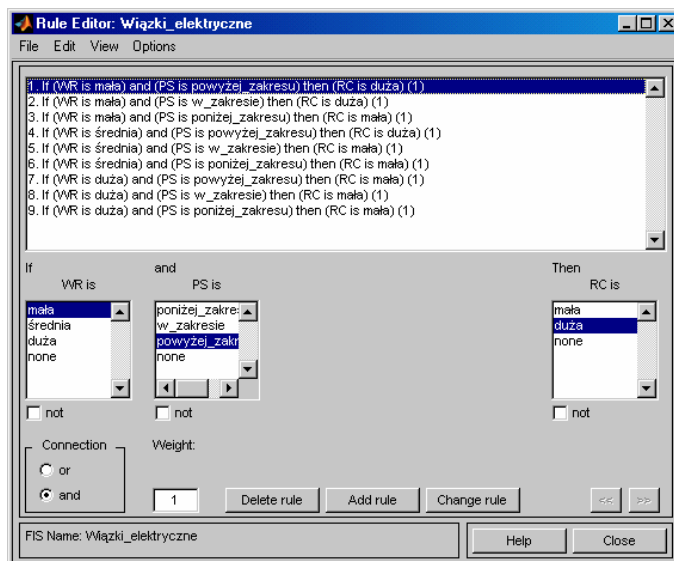
Pierwszym krokiem w funkcjonowaniu modelu rozmytego systemu ekspertowego będzie rozmywanie. Krok ten sprowadza się do przekształcenia ostrych wartości wejść do systemu na wartości rozmyte. Wykonywane jest to na podstawie wcześniej zdefiniowane funkcje przynależności (rys. 93–95). W kolejnym kroku (b) następuje wybór reguły wnioskowania ze zdefiniowanej wcześniej bazy wiedzy. W analizowanym przykładzie systemu produkcyjnego wiązek elektrycznych proponuje się zastosowanie architektury Mamadaniego. Każda z reguł jest spełniona w pewnym stopniu, ponieważ wejścia miały pewne określone stopnie przynależności do odpowiadającym im zbiorów rozmytych. Jeżeli przesłanka reguły składa się z dwóch przesłanek dotyczących dwóch wejść połączonych, spójnikiem koniunkcyjnym „oraz”, to stopień przynależności do całej reguły liczy się najczęściej jako stopień przynależności do całej relacji, będącej iloczynem dwóch zmiennych rozmytych. Końcowy wynikowy zbiór rozmyty jest otrzymywany jako suma konkluzji poszczególnych reguł. W końcowym kroku wnioskowania (b) otrzymywana jest wartość zmiennej wyjściowej w postaci zbioru rozmytego. Ostatnim krokiem etapu 2 jest wyostrzanie (krok c). Umożliwia on na przekształcenie wyjściowego zbioru rozmytego na postać wielkości ostrej. W literaturze proponuje się kilka metod defuzyfikacji, a najpopularniejsze z nich to metoda środka maksimum, środka ciężkości i środka sum [75, 110].

Uznano, że najlepiej zweryfikować funkcjonowanie zaprojektowanego modelu systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonych celów produkcyjnych w specjalistycznym oprogramowaniu, na które wybrano oprogramowanie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox, którego ogólny widok przedstawiono na rysunku 96.

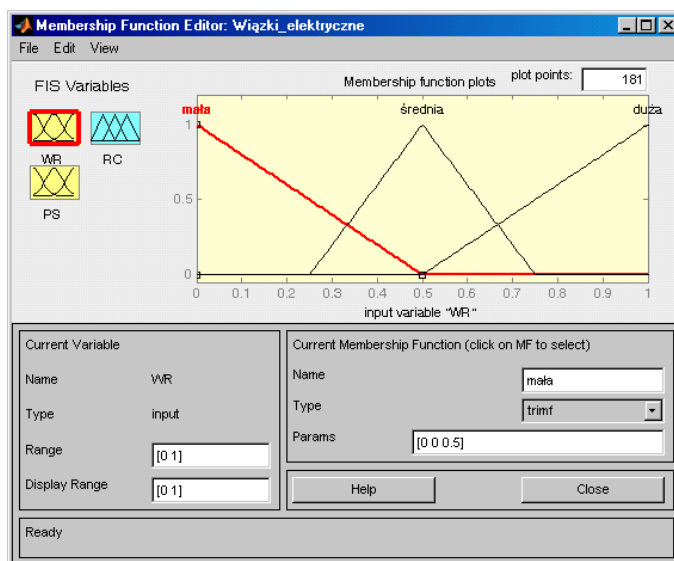


Rys. 96. Ogólny widok programu wykorzystanego do budowy systemu ekspertowego

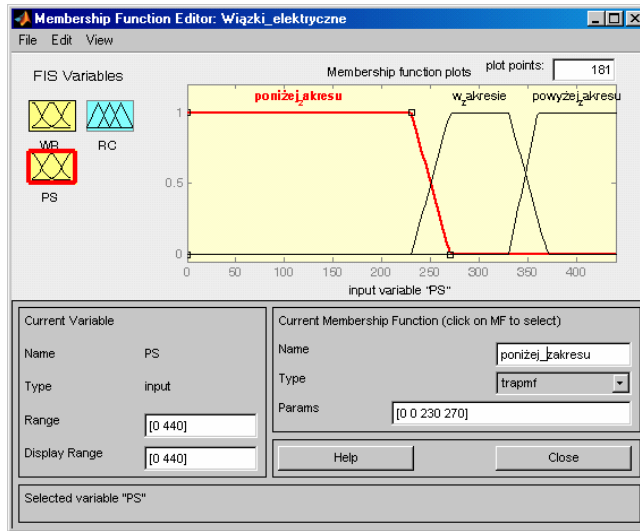
Dla omawianego przykładu systemu produkcji wiązek elektrycznych zaimplementowano opracowaną bazę reguł (rys. 97) i funkcje przynależności (rys. 98–100).



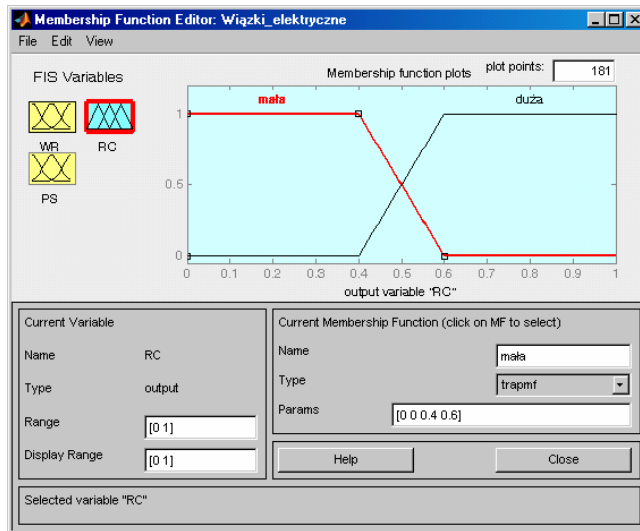
Rys. 97. Widok zaimplementowanej bazy reguł w programie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox



Rys. 98. Zdefiniowane funkcje przynależności w programie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox dla zmiennej lingwistycznej „wielkość ryzyka” (WR)



Rys. 99. Zdefiniowane funkcje przynależności w programie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox dla zmiennej lingwistycznej „poziom stabilności” (PS)



Rys. 100. Zdefiniowane funkcje przynależności w programie Matlab z Fuzzy Logic Toolbox dla zmiennej lingwistycznej „możliwość realizacji planu (celu)” (RC)

Ułatwiło to wykorzystanie rozmytego systemu regulowego o architekturze Mamdaniego do określenia wartości możliwości realizacji planu (celu). Dla danych wejściowych do tego systemu $Y_1 = 0,2$ oraz $Y_2 = 280$ uzyskano wartość $U = 0,95$.

Oznacza to, że dla tych wartości zmiennych objaśniających możliwość realizacji założonego planu (celu), czyli produkcji 300 sztuk wiązek elektrycznych w trakcie zmiany produkcyjnej, jest duża, ponieważ wynosi 95%.

6.3. WNIOSKI

Połączenie modeli symulacyjnych i modeli sztucznych sieci neuronowych może przynieść wiele korzyści w ocenie możliwości realizacji założonych planów produkcyjnych. Dla założenia realności planu produkcji możliwość jego wykonania zależy jedynie od czynników ryzyka i od poziomu stabilności systemu produkcyjnego. Implementacja proponowanego hybrydowego systemu ekspertowego w systemie produkcyjnym umożliwiłaby zarządzającym lepsze planowania terminów zakończenia przyjętych do realizacji zleceń produkcyjnych w warunkach pojawiających się losowo czynników ryzyka.

W pracy zaproponowano połączenia obydwu typów modeli przez model hybrydowego systemu ekspertowego do oceny możliwości realizacji założonych celów produkcyjnych. Elementem łączącym obydwie typy modeli jest baza reguł decyzyjnych. Wejściami do proponowanego systemu ekspertowego będą dwie zmienne objaśniające, pochodzące z wyniku modelu symulacyjnego (wielkość ryzyka) oraz z wyniku modelu SSN (poziom stabilności) analizowanego systemu produkcyjnego. Dla obydwu zmiennych objaśniających i dla zmiennej objaśnianej ustalono zbiór funkcji przynależności reprezentujących przyjęte zmienne lingwistyczne, a następnie wyznaczono reguły decyzyjne. Sposób działania tak zaprojektowanego systemu przetestowano w programie Matlab, modułu Toolbox Fuzzy na przykładzie systemu produkcyjnego wiązek elektrycznych.

7. PODSUMOWANIE

Prawidłowe zaplanowanie i sterowanie przebiegiem produkcji stanowi warunek niezbędny do realizacji założonego celu stawianego przed systemem produkcyjnym. Celem tym zazwyczaj jest wyprodukowanie zaplanowanej ilości wyrobów o odpowiednich parametrach jakościowych i kosztowych w odpowiednim czasie. Aby realizacja celu była możliwa, system musi być stabilny, czyli musi zachowywać stan równowagi przez założony okres. Realizacja zaplanowanych celów będzie możliwa, jeśli wartości parametrów określających system będą znajdować się w przedziałach, zdefiniowanych w funkcji planowania. Zapewnienie stabilności systemu produkcyjnego z jednej strony sprowadza się do odpowiedniego sterowania nim, a z drugiej do eliminowania wpływu czynników ryzyka. Osobom podejmującym decyzje potrzebne są narzędzia w postaci różnego typu modeli, według których można podejmować szybkie decyzje obciążone jak najmniejszym ryzykiem.

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania wybranych metod modelowania do zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych. Zagadnienie stabilności systemu produkcyjnego rozpatrywano zarówno w aspekcie jego bieżącego funkcjonowania (eksploatacji), jak i rozwoju (reorganizacji). W tym kontekście przeanalizowano różne rodzaje modeli schematycznych, modele symulacyjne i modele sztucznych sieci neuronowych. W celu uwidocznienia różnic pomiędzy prezentowanymi modelami zestawiono ich dane wejściowe potrzebne do ich budowy i dane wyjściowe będące rezultatami ich budowy i eksperymentów. Wszystkie porównano ze względu na wybrane kryteria budowy oraz wykorzystania w analizie i ocenie stabilności. Również w tabeli 31 przedstawiono zbiorcze porównanie wszystkich prezentowanych w pracy modeli. Wszystkie zamieszczone w pracy porównania, zestawienia cech, danych i innych właściwości modeli mają ułatwiać zarządzającym systemami produkcyjnymi dobór modelu do charakteru i rodzaju decyzji.

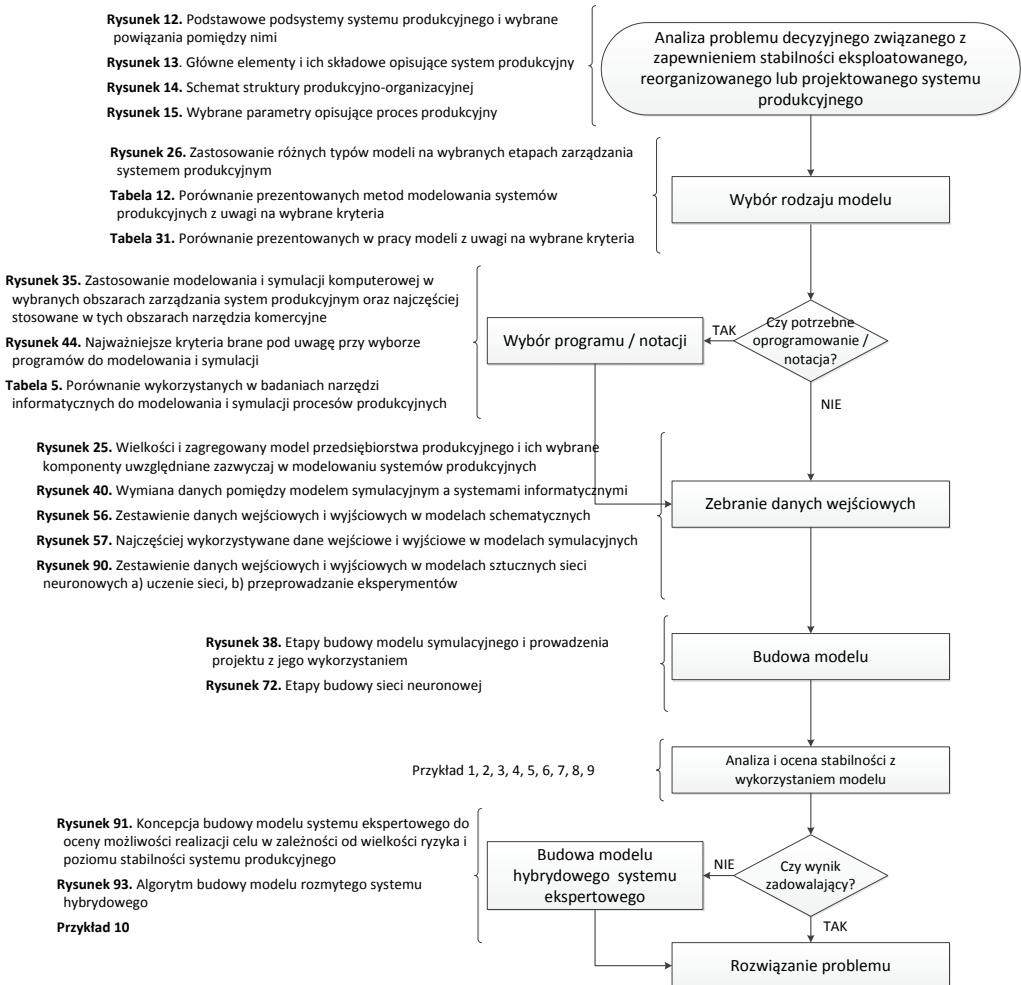
Dla każdego typu modelu przedstawiono przykłady możliwości zastosowania w rzeczywistym systemie produkcyjnym. Prezentując przykład, scharakteryzowano zarówno specyfikę systemu produkcyjnego, jak i problem decyzyjny, który był rozwiązywany za pomocą modelu. Dla modeli symulacyjnych i SSN wykorzystano ten sam przykład, za który posłużył system produkcji wiązek elektrycznych. Dzięki temu

Tabela 31. Porównanie prezentowanych w pracy modeli ze względu na wybrane kryteria

Kryterium	Modele schematyczne			Modele symulacyjne	Modele SSN
	graficzne	mapy	modele procesów biznesowych		
Stopień szczegółowości modelu	1	2	2-4	3-5	3-5
Potrzeba zasilenia danymi	0	1-2	1-3	4	5
Wyniki w postaci cyfrowej	0	0	0	4-5	5
Możliwość zastosowania w sterowaniu systemem	0	0	0	3	5
Możliwość zastosowania do reorganizacji systemu	3-5	5	5	3	0
Wykorzystanie na poziomie strategicznym	4-5	4-5	3-5	2-4	2-4
Wykorzystanie na poziomie taktycznym	3-4	3-4	3-4	4-5	4-5
Wykorzystanie na poziomie operacyjnym	1-2	1-2	1-2	4-5	5
Pracochłonność budowy modelu	2-3	2-3	3-4	4-5	3-4
Poziom szczegółowości wyników	0	1	1	4-5	4-5
Wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania	1	1	2-3	5	5
Stosowanie specjalistycznej metodyki modelowania	0	1	4	0	0
Potrzeba doświadczenia w budowie modelu	0	2-4	2-4	5	2-3
Konieczność programowania	0	0	0	3	0

Legenda: 0 – wcale, 1 – bardzo małe, 2 – małe, 3 – średnie, 4 – duże, 5 – bardzo duże

wyeliminowano różnice wynikające z odmiennej specyfiki prezentowanych systemów produkcyjnych. Wszystkie pokazane w pracy przykłady praktyczne należy traktować jako jedną, wielowymiarową koncepcję wykorzystania modelowania w ocenie i zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych. Złożoność zagadnienia modelowania, jak i różnorodność systemów produkcyjnych powoduje, że do zapewnienia stabilności systemu produkcyjnego można jedynie zaproponować bardzo ogólną metodykę. Na rysunku 96 przedstawiono schemat postępowania w wykorzystaniu modeli do analizy i oceny stabilności systemów produkcyjnych. Oprócz ogólnych etapów metodyki przedstawiono na nim również prezentowane w pracy rysunki, tabele oraz przykłady, które mogą być praktyczne pomocne w jej stosowaniu.



Rys. 101. Ogólna metodyka wykorzystania modeli systemów produkcyjnych w zapewnieniu stabilności produkcji

Ostatnią część pracy stanowi koncepcja fuzji modeli symulacyjnych i SSN. Połączenie obydwu typu modeli umożliwia wykorzystanie zalet obydwu z nich oraz pełniejszą analizę problemu zapewnienia stabilności systemów produkcyjnych. Literatura nie proponuje tego typu rozwiązań. Wynika to ze zbyt dużych różnic pomiędzy poszczególnymi rodzajami modeli. W pracy proponuje się zatem połączenie obydwu rodzajów modeli przez bazę reguł decyzyjnych i wnioskowanie rozmyte. Wejściami do systemu jest wielkość ryzyka oraz poziom stabilności wyznaczone przez model symulacyjny i SSN. Wyjściem z modelu ekspertowego jest wartość zmiennej określającej możliwość realizacji celu. W budowie modelu wykorzystano wnioskowanie rozmyte, które wykorzystuje zmienne lingwistyczne i charakteryzuje się systemem wiedzy w postaci rozmytych reguł „jeżeli ..., to ...”. Dla obydwu zmiennych objaśniających i dla zmiennej objaśnianej zaproponowano zbiór funkcji przynależności reprezentujących przyjęte zmienne lingwistyczne, a następnie wyznaczono reguły decyzyjne. Budowę tak zaprojektowanego modelu proponuje się w oprogramowaniu Matlab z Fuzzy Logic Toolbox.

Aby analiza i ocena stabilności systemów produkcyjnych mogła być na stałe włączona w system zarządzania przedsiębiorstwem przemysłowym, potrzebne są dalsze prace nad rozwojem i integracją modeli systemów produkcyjnych. Umożliwiłoby to połączenie zalet różnych typów modeli, a przez to na lepszą ocenę wpływu planowanych decyzji na pozostałe obszary funkcjonalne. Prace powinny być również prowadzone nad rozwojem narzędzi informatycznych do budowy modeli. Z jednej strony potrzebna jest większa uniwersalność oferowanych na rynku narzędzi, a z drugiej możliwość automatycznego zasilania ich danymi pochodzącymi z systemów produkcyjnych. Aby przedsiębiorstwa mogły w pełni zauważyć korzyści z modelowania systemów produkcyjnych w celu zapewnienia ich stabilności, potrzebne byłoby również opracowanie metod szacowania start finansowych powstałych w wyniku utraty stabilności przez system produkcyjny.

LITERATURA

- [1] ABU-TAIEH E., EL SHEIKH A., *Commercial Simulation Packages: a Comparative Study*, International Journal of Simulation, Vol. 8, No. 2, 2007.
- [2] ADAMCZYK Z., JEMIELNIAK K., KOSMOL J., SOKOŁOWSKI A., *Monitorowanie ostrza skrawającego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe*, WNT, Warszawa, 1996.
- [3] AGRAWAL N., *Review on Just in Time Techniques in Manufacturing Systems*, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 5, No. 2, 2010.
- [4] ALABDULKARIM A., BALL P., TIWARI A., *Rapid Modelling of Field Maintenance Using Discrete Event Simulation*, [w:] Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2011.
- [5] AMAYA D., CASTILLO R., ROSARIO J., *Modelling and Simulation of Hybrid Architecture Manufacturing Systems*, International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 5, No. 4, 2011.
- [6] ANU M., *Introduction to Modelling and Simulation*, [w:] Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2007.
- [7] AZADEGAN A., PROBIC L., GHAZINOORY S., SAMOUEI P., *Fuzzy Logic in Manufacturing: A Review of Literature and a Specialized Application*, International Journal of Production Economics Vol. 132, No. 2, 2011.
- [8] AZADEH A., HAGHNEVIS M., KHODADADADEGAN Y., *Design of the Integrated Information System, Business and Production Process by Simulation*, Journal of the American Society for Information Science and Technology, Vol. 59, No. 2, 2008.
- [9] BANASZAK Z., KŁOS S., MLECZKO J., *Zintegrowane systemy zarządzania*, PWE, Warszawa, 2011.
- [10] BANASZAK Z., *Modele i algorytmy sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009.
- [11] BANASZAK Z., *Zarządzanie operacjami*, Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra, 1997.
- [12] BANASZAK Z., DRZAZGA A., KUŚ J., *Metody interakcyjnego modelowania i programowania procesów dyskretnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1993.
- [13] BARKER R., LONGMAN C., *CASE*Method: Modelowanie funkcji i procesów*, WNT, Warszawa, 1996.
- [14] BARKER R., LONGMAN C., *CASE*Method: Modelowanie związków encji*, WNT, Warszawa, 1996.
- [15] BARRON A.R., *Approximation and Estimation Bounds for Artificial Neural Networks*, Machine Learning, Vol. 14, 1994.
- [16] BARTKOWIAK M., *Karty kontrolne obrazem zmienności procesu*, Kwartalnik Nauk o Przedsiębiorstwie, nr 3, 2011.
- [17] BEN KHEDHER A., HENRY S., BOURAS A., *Integration Between MES and Product Life Cycle Management*, [w:] IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, France, 2011.

- [18] BIAŁKO M., *Sztuczna inteligencja i elementy hybrydowych systemów ekspertowych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2005.
- [19] BIERNACKI P., *Dlaczego BPMN?*, [w:] *Inżynieria produkcji. Wiedza – wizja – programy ramowe*, pod red. E. Chlebusa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
- [20] BINDER R. V., *Testowanie systemów obiektowych: modele, wzorce i narzędzia*, WNT, Warszawa, 2003.
- [21] BIZON-GÓRECKA J., *Inżynieria niezawodności i ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz, 2001.
- [22] BOJARSKI W., *Podstawy analizy i inżynierii systemów*, PWN, Warszawa, 1984.
- [23] BUBNICKI Z., *Podstawy informatycznych systemów zarządzania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1993.
- [24] BUBNICKI Z., *Teoria i algorytmy sterowania*, PWN, Warszawa, 2005.
- [25] BUKOWSKI M., SZPOR A., ŚNIEGOCKI A., *Potencjał i bariery polskiej innowacyjności*, Instytut Badań Strukturalnych, Warszawa, 2012.
- [26] BURDUK A., STEFANIAK P., *Application of a Perceptron Artificial Neural Network for Building the Stability of a Mining Proces*, [w:] *Lecture Notes in Computer Science*, Brazylia, 2012.
- [27] BURDUK A., *Assessment of Risk in a Production System with the Use of the FMEA Analysis and Linguistic Variables*, [w:] *Lecture Notes in Computer Science, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 7th International Conference Hybrid Artificial Intelligent Systems, Vol. 7209, Spain, 2012.
- [28] BURDUK A., DĄBEK K., *Stability of Processes in the Mining Industry*, AGH Journal of Mining and Geoen지니어ing, Vol. 36, No. 3, 2012.
- [29] BURDUK A., DĄBEK K., KOWALSKI A., STEFANIAK P., *Ocena stabilności wybranego procesu z przemysłu wydobywczego*, Journal of Transdisciplinary Systems Science, Vol. 16, No. 2, 2012.
- [30] BURDUK A., CHLEBUS E., HELMAN J., ROSIENKIEWICZ M., TEODORSKI D., *Koncepcja mapowania procesu wydobywczego metodą VSM*, Journal of Transdisciplinary Systems Science, Vol. 16, No. 2, 2012.
- [31] BURDUK A., *Methods of Production Risk Assessment*, Wydawnictwo PRINTPAP, Łódź, 2011.
- [32] BURDUK A., *Evaluation of the Risk in Production Systems with a Parallel Reliability Structure Taking Into Account Its Acceptance Level*, [w:] *Lecture Notes in Computer Science, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 6th International Conference Hybrid Artificial Intelligent Systems, Vol. 6679, Poland, 2011.
- [33] BURDUK A., *An Attempt to Adapt Serial Reliability Structures for the Needs of Analyses and Assessments of the Risk in Production Systems*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, nr 3, 2010.
- [34] BURDUK A., KURIATA Ł., *Analysis and Optimisation of Work-in-progress Inventories with the Use of Simulation Tools*, [w:] *Logistics in the enterprises – selected aspects: monograph*, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań, 2010.
- [35] BURDUK A., CHLEBUS E., *Methods of Risk Evaluation in Manufacturing Systems*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 3, 2009.
- [36] BURDUK A., CHLEBUS E., *Evaluation of the Risk in Production Systems with a Parallel Reliability Structure*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, nr 2, 2009.
- [37] BURDUK A., CHLEBUS E., *Improving the Production Capacities of a Production Process with the Use of its Tools for Modelling and Simulation*, [w:] *Efficiency of production processes: monograph*, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań, 2009.
- [38] BURDUK A., *Ocena ryzyka w systemach produkcyjnych o szeregowej strukturze niezawodnościowej*, Logistyka, nr 1, 2007.
- [39] BURDUK A., *Metody szacowania ryzyka w systemach produkcyjnych*, [w:] *Inżynieria produkcji. Wiedza – wizja – programy ramowe*, pod red. E. Chlebusa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.

- [40] BURDUK A., CHLEBUS E., *Variant Simulation in Design and Risk Estimation of Manufacturing System*, Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 17, No. 4, 2006.
- [41] BURDUK A., *Metodyka aplikacji modeli symulacyjnych w planowaniu i ocenie ryzyka realizacji procesów produkcyjnych*, rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław, 2004.
- [42] BURDUK A., CHLEBUS T., GAJEWSKI E., WIERZCHOWSKI L., *Ocena produktywności przedsiębiorstw metodami symulacyjnymi*, [w:] *Automatyzacja produkcji. AP 2003. Nauka – wiedza – innowacje*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [43] BRZEZIŃSKI M., *Organizacja i sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa, 2000.
- [44] CAO H., FOLAN P., MASCOL J., BROWNE J., *RFID in Product Lifecycle Management: a Case in the Automotive Industry*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 22, No. 7, 2009.
- [45] CHAJTMAN S., ZYZIK M., *Business Process Model: An Objective Description*, [w:] Proceedings of the 12th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, 2008.
- [46] CHOCJAN J., ŁĘSKI J., *Ziory rozmyte i ich zastosowania*. Praca dedykowana Profesorowi Ernestowi Czogale, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001.
- [47] CEMPEL C., *Teoria i inżynieria systemów – zasady i zastosowania myślenia systemowego*, Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom, 2008.
- [48] CEMPEL C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN, Warszawa, 1989.
- [49] CHENG F., *Methodology for Developing Robotic Workcell Simulation Model*, [w:] Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, Orlando, USA, 2000.
- [50] CHENG F., Ettl M., LU Y., YAO D., *A Production – Inventory Model for a Push – Pull Manufacturing System with Capacity and Service Level Constraints*, Production and Operations Management, Vol. 21, No. 4, 2012.
- [51] CHLEBUS E., *Techniki innowacyjne w kształtowaniu konkurencyjności przedsiębiorstwa w warunkach globalizacji*, [w:] Konferencja Polskiego Stowarzyszenia Upowszechniania Komputerowych Systemów Inżynierskich PROCAX, CAD/CAM Forum, 2002.
- [52] CHLEBUS E., CZAJKA J., KROT K., KULIBERDA M., PATRONIK P., SAWICKI P., WIECZOREK A., *Opracowanie modułu generacyjnego system wspomagającego opracowanie technologii obróbki w technicznym przygotowaniu i planowaniu produkcji*, Raport Serii Preprinty nr 4/2012, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2012.
- [53] CHLEBUS E., BURDUK A., KOWALSKI A., *Usprawnienia przepływu materiałów na hali produkcyjnej za pomocą modeli symulacyjnych*, Gospodarka Materiałowa i Logistyka, R. 62, nr 8, 2010.
- [54] CHLEBUS E., BURDUK A., KOWALSKI A., *Analiza i usprawnienie procesu produkcyjnego z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych*, [w:] *Automatyzacja procesów dyskretnych: teoria i zastosowania*, t. 2, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2010.
- [55] CHLEBUS E., BURDUK A., KOWALSKI A., *Modelling and Computer Simulation as Tools for Reorganization of Production Processes*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 18, No. 3B, 2009.
- [56] CHLEBUS E., KROT i in., *Modelowanie i planowanie procesów wytwórczych w środowisku technologicznych obiektów elementarnych*, Raport Serii Preprinty nr 9/2009, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- [57] CHLEBUS E., CZAJKA J., CHOLEWA M., KROT K., SUSZ S., KOWALSKI A., BURDUK A., *Opracowanie hybrydowego system CAD/CAPP wspomagającego projektowanie i planowanie procesów wytwarzania*, Raport Serii Preprinty nr 12/2007, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2007.

- [58] CHLEBUS E., CZAJKA J., CHOLEWA M., KROT K., SUSZ S., KOWALSKI A., BURDUK A., *Opracowanie systemu komputerowego wspomagającego konfigurowanie procesowo zorientowanych systemów wytwórczych*, Raport Serii Preprinty nr 14/2007, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, 2007.
- [59] CHLEBUS E., BURDUK A., CHROBOT J., KOWALSKI A., WIERZCHOWSKI L., *Wariantowa symulacja i optymalizacja systemu produkcyjnego w fabryce Bombardier Transportation Polska*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, R. 7, nr 2, 2004.
- [60] CHLEBUS E., KOWALSKI A., *Application of Modelling and Simulation in Analysis and Design of Manufacturing Systems*, [w:] Proceedings of the International Workshop on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling & Simulation, HMS 2003, Riga, 2003.
- [61] CHLEBUS E., BURDUK A., i in., *Optymalizacja rozmieszczenia linii produkcyjnych w GKN Automotive Polska*, [w:] *Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [62] CHLEBUS E., BURDUK A., SUSZ S., *Systemy Workflow – modelowanie i symulacja przepływu pracy*, [w:] *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, pod red. R. Konosali, WNT, Warszawa, 2001.
- [63] CHLEBUS E., *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa 2000.
- [64] CHOLEWA M., *Product Lifecycle Management*, Wydawnictwo PRINTPAP, Łódź, 2011.
- [65] CHOLEWA M., *Model danych w technologicznym projektowaniu procesów wytwarzania i jego integracja z systemami PDM*, rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, 2001.
- [66] CHRYSOLOURIS G., MAVRIKOS D., PAPASTAKOS N., *Digital Manufacturing: History, Perspectives, and Outlook*, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 223B, 2009.
- [67] CHRISTO C., CARDEIRA C., *Trends in Intelligent Manufacturing Systems*, [w:] Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, Vigo, Spain, 2007.
- [68] CISZAK O., *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [w:] *Budowa maszyn i zarządzanie produkcją*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, No. 6, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2007.
- [69] COLLEDANI M., TOLIO T., *Integrated Analysis of Quality and Production Logistics Performance in Manufacturing Lines*, International Journal of Production Research, Vol. 49, No. 2, 2011.
- [70] COTTYN J., VAN LANDEGHEM H., STOCKMAN K., DERAMMELAERE S., *A Method to Align a Manufacturing Execution System with Lean Objectives*, International Journal of Production Research, Vol. 49, No. 14, 2011.
- [71] CZAJKA J., KROT K., KULIBERDA M., *Selected Issues of Production Systems Organisation and Computer Aided Process Planning*, Wydawnictwo PRINTPAP, Łódź, 2011.
- [72] CZAJKA J., *Projektowanie topologii systemu wytwórczego na podstawie zadań technologicznych*, rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, 2003.
- [73] CZARNY T., *Metody identyfikacji systemów produkcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1979.
- [74] CZEKAJ J., *Zarządzanie procesami biznesowymi. Aspekt metodyczny*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków, 2011.
- [75] CZOGAŁA E., PERDYCZ W., *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*, PWN, Warszawa, 1985.
- [76] DAGLI C., *Artificial Neural Network for Intelligent Manufacturing*, Chapman & Hall, London, 1994.
- [77] DRUCKER P.F., *The Emergency Theory of Manufacturing*, Harvard Business Review, No. 3, 1990.
- [78] DUCH W., KORBICZ J., RUTKOWSKI L., TADEUSIEWICZ R., *Sieci neuronowe*, [w:] *Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna*, t. 6, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2000.

- [79] DURLIK I., *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, Część I, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa, 1995.
- [80] DURLIK I., *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, Część II, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa, 1996.
- [81] ERICH A., *Ryzyko gospodarcze – Encyklopedia organizacji i zarządzania*, PWE, Warszawa 1981.
- [82] *Encyklopedia Powszechna*, PWN, Warszawa, 1987.
- [83] FAIRLIE-CLARKE T., MULLER M., *An Activity Model of the Product Development Process*, Journal of Engineering Design, Vol. 14, No. 3, 2003.
- [84] FEDERAL INFORMATION PROCESSING STANDARDS PUBLICATIONS (FIPS PUBS), *Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)*, Computer Systems Laboratory of the National Institute of Standards and Technology, <http://www.idef.com/pdf/idef0.pdf>, 02.07.2012.
- [85] FISHMAN G., *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, PWE, Warszawa, 1981.
- [86] FLAKIEWICZ W., *Systemy informacyjne w zarządzaniu*, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa, 2000.
- [87] FLASIŃSKI M., *Wstęp do sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa, 2011.
- [88] FU M., YONG M., *Simulation-enabled Casting Product Defect Prediction in Die Casting Process*, International Journal of Production Research, Vol. 47, No. 18, 2009.
- [89] FURRER D., THALER S., *Neural-network Modeling Tools Enable the Engineer to Study and Analyze the Complex Interactions Between Material and Process Inputs with the Goal of Predicting Final Component Properties*, Advanced Materials & Processes, 2005.
- [90] GAWLIK J., KIELBUS A., *Chosen Aspects of Innovative Projects Management*, Archives of Foundry Engineering, Vol. 10, No. 3, Wydanie specjalne, 2010.
- [91] GAWLIK J., KIELBUS A., *Metody i narzędzia w analizie jakości wyrobów*, Wydawnictwo PK, Kraków, 2008.
- [92] GOŚCIŃSKI J., *Sterowanie i planowanie. Ujęcie systemowe*, PWE, Warszawa, 1982.
- [93] GRACEL J., GROBLER-DĘBSKA K., DUTKIEWICZ L., *Analiza przepływu informacji między systemami klasy ERP, APS i MES w obszarze zarządzania produkcją*, [w:] Materiały VI Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych, Kraków, 2011.
- [94] GREGOR M., HALUSKOWA M., HROMADA J., MATUSZEK J., *Simulation of Manufacturing System*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 1998.
- [95] GREGOR M., MEDVECKY Š., MATUSZEK J., *Cyfrowa fabryka*, Produktywność i Innowacje, Vol. 2, No. 1, 2006.
- [96] GRIEVERS M., *Product Lifecycle management – Driving the Next Generation of Lean Thinking*, Wydawnictwo MC Graw-Hill, New York, 2006.
- [97] GUTENBAUM J., *Modelowanie matematyczne systemów*, Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2003.
- [98] HAMROL A., MANTURA W., *Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka*, PWN, Warszawa, 2002.
- [99] HARRELL C., GHOSH K., BOWDEN R., *Simulation using ProModel*, Mc Graw Hill, Higher Education, 2000.
- [100] HON K., *Performance and Evaluation of Manufacturing Systems*, International Academy of Production Engineering (CIRP), No. 54 (2), 2005.
- [101] HORACZENKO J., *Zastosowanie logiki rozmytej w systemach wytwarzania*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń. Kwartalnik Komitetu Budowy Maszyn PAN, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, vol. 20, nr. 2, 1996.
- [102] HUBKA V., EDER W. E., *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*, Springer, London, 1996.
- [103] HUET G., FORTON C., MCSORLEY G., TOCHE B., *Information Structures and Processes to Support Data Exchange between product Development and Resource Planning Systems*, [w:] International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Montreal, 2009.

- [104] JACKOWICZ R., LIS S., *Podstawy projektowania struktur przedsiębiorstw przemysłowych*, PWN, Warszawa, 1989.
- [105] JARDZIOCH A., HORACZENKO J., *Production Planning Method Based on Soft Computing*, [w:] Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Vol. I, Las Vegas, Nevada, 1999.
- [106] JARVELIN A., JUHOLA M., LAINE M., *Neural Network Modelling of Word Production in Finnish: Coding Semantic and Non-semantic Features*, Neural Computing & Applications, Springer, London, 2005.
- [107] JHA S., K., *Product Development in Production-Networks*, International Journal of Industrial Engineering & Production Research, Vol. 23, No. 3, 2012.
- [108] JOVANE F., WESTKAMPER E., WILLIAMS D., *The Manufature Road. Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing*, Springer, 2009.
- [109] JOVANE F., KOREN Y., BOER C., *Present and Future of Flexible Automation*. Roczniki International Academy of Production Engineering (CIRP), No. 52 (2), 2003.
- [110] KACPRZYK J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa, 2001.
- [111] KACPRZYK T., ŚLOT K., *Sieci neuronowe komórkowe. Teoria, projektowanie, zastosowania*, PWN, Warszawa–Łódź, 1995.
- [112] KACZMARCZYK A.: *IDEF – metody modelowania i projektowania do komputerowo wspomaganiej inżynierii biznesu*, Informatyka, nr 11–12, 1998.
- [113] KARIM M., SAMARANYAKE P., SMITH A., HALGAMUGE S., *An On-Time Delivery Improvement Model for Manufacturing Organisations*, International Journal of Production Research, Vol. 48, No. 8, 2010.
- [114] KARPIŃSKI T., *Inżynieria produkcji*, WNT, Warszawa, 2011.
- [115] KASPRZAK T., *Modele referencyjne w zarządzaniu procesami biznesu*, Difin, Warszawa 2005.
- [116] KAŻMIERCZAK J., *Eksploatacja systemów technicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [117] KILIŃSKI A., *Ogólna teoria niezawodności*, WNT, Warszawa, 1971.
- [118] KLUGE P.D., *Komputerowo wspomagany controlling w małych i średnich przedsiębiorstwach*, Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra, 2001.
- [119] KNOSALA R. i in., *Komputerowe wspomaganie zarządzania przedsiębiorstwem. Nowe metody i systemy*, PWE, Warszawa, 2007.
- [120] KNOSALA R. i zespół, *Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa, 2002.
- [121] KORONACKI J., *Metody statystycznego sterowania jakości*, www.ststsoft.pl [dostęp: 12.03.2012].
- [122] KORBICZ J., OBUCHOWICZ A., UCIŃSKI D., *Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994.
- [123] KOSIERADZKA A., LIS S., *Produktywność. Metody analizy oceny i tworzenia programów poprawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [124] KOWALSKI A., *Forecasting and Simulation of Production Processes*, Wydawnictwo PRINTPAP, Łódź, 2011.
- [125] KRUPA K., *Modelowanie, symulacja i prognozowanie*, WNT, Warszawa 2008.
- [126] KULCZYCKI P., HRYNIEWICZ O., KACPRZYK J., *Techniki informacyjne w badaniach systemowych*, WNT, Warszawa, 2007.
- [127] LAKEMOND N., SAFSTEN K., JOHANSSON G., MAGNUSSON T., *From Product Development to Production – On the Complexity of Geographical and Organizational Dispersion*, Journal of Applied Economics and Business Research, Vol. 2, No. 3, 2012.
- [128] LANGE O., *Wstęp do cybernetyki ekonomicznej. Dzieła wybrane*, t. 7, PWE, Warszawa, 1977.
- [129] LASEK M., OTMIANOWSKI B., *BPMN – standard opisywania procesów biznesowych. Budowa modeli procesów BPMN w iGrafix*, WSISiZ, Warszawa, 2007.

- [130] LAW A.M, KELTON W.D., *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [131] LENART A., *Zintegrowane systemy informatyczne klasy ERP. Teoria i praktyka na przykładzie systemu BAAN IV*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2006.
- [132] LESZCZYŃSKI J., *Modelowanie systemów i procesów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1994.
- [133] LI L., CHANG Q., NI J., BILLER S., *Real Time Production Improvement Through Bottleneck Control*, International Journal of Production Research, Vol. 49, No. 21, 2009.
- [134] LIS S., *Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych*, PWN, Warszawa, 1994.
- [135] LIS S., *Organizacja i ekonomika procesów produkcyjnych w przemyśle maszynowym*, PWN, Warszawa, 1984.
- [136] ŁĘSKI J., *Systemy neuronowo-rozmyte*, WNT, Warszawa, 2008.
- [137] MACHOWSKI J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007.
- [138] MARKOWSKA-KACZMAR U., KWAŚNICKA H., *Sieci neuronowe w zastosowaniach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.
- [139] MATUSZEK J., KURCZYK D., *Tendencje rozwojowe w projektowaniu i zarządzaniu procesami produkcyjnymi*, [w:] Materiały konferencji „Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji”, Zakopane, 2013.
- [140] MATUSZEK J., GREGOR M., KURCZYK D., *Zastosowanie wielkoformatowego skanowania obiektów w procesach przygotowania produkcji*, [w:] Materiały konferencji „Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji”, Zakopane, 2006.
- [141] MATUSZEK J., *Zarządzanie przedsiębiorstwem XXI wieku*, Przegląd Mechaniczny, nr 2, 2002.
- [142] MATUSZEK J., *Inżynieria produkcji*, Wydawnictwo Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2000.
- [143] MIGDAŁSKI J. i in., *Inżynieria niezawodności*, Wydawnictwo ZETOM, Warszawa 1992.
- [144] MIGDAŁSKI A., *Ogólna teoria niezawodności i jej zastosowanie w elektryce*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, 1984.
- [145] MING-SHAN L., YING-JIE L., *Dynamic Dispatching for a Flexible Manufacturing System Based on Fuzzy Logic*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 54, 2011.
- [146] MOLLAGHASEMI M., LECROY K., GEORGIPOULS M., *Application of Neural Networks and Simulation Modelling in Manufacturing System Design*, Interfaces, Vol. 28, No. 5, 1998.
- [147] MONTEVECHI J., LEAL F., MARINS F., JESUS J., *Combined Use of Modeling Techniques for the Development of the Conceptual Model in Simulation Projects*, [w:] Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999.
- [148] MONTGOMERY D., *Introduction to Quality Control*, Wiley, Nowy York, 2005.
- [149] MUHLEMANN A., OAKLAND J., LOCKYER K., *Zarządzanie. Produkcja i usługi*, PWN, Warszawa, 2001.
- [150] NAHOTKO S., *Ryzyko ekonomiczne w działalności gospodarczej*, Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz, 1997.
- [151] NIDERLIŃSKI A., *Systemy i sterowanie. Wstęp do automatyki i cybernetyki technicznej*, PWN, Warszawa, 1983.
- [152] NOWAKOWSKI T., *Niezawodność systemów logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
- [153] NOWAKOWSKI T., *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*, Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn nr 82, Monografie nr 28, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999.
- [154] NOWOSIELSKI S., *Modelowanie procesów gospodarczych w literaturze i praktyce, Podejście naukowe w organizacjach*, pod red. S. Nowosielskiego, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław, 2011.

- [155] NOYES J., *Neural network training*, [w:] *Handbook of Neural Computation*, IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997.
- [156] OBJECT MANAGEMENT GROUP, *Business Process Modeling Notation, Specification*. Technical Report dtc/06-02-01, OMG, February 2006.
- [157] Oslo Manual, *Guidelines form Collecting and Interpreting Innovation Data*, OECD and Eurostat, 2005.
- [158] OSOWSKI S. *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*, WNT, Warszawa, 1996.
- [159] OSOWSKI S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [160] OSTROWSKA E., *Ryzyko projektów inwestycyjnych*, PWE, Warszawa, 2002.
- [161] OZLEM U.A., LATIF S., *A Multi-criteria Adaptive Scheme Based on Neural Networks and Fuzzy Inference for DRC Manufacturing Systems*, International Journal of Production Research, Vol. 48, No. 1, 2010.
- [162] PAJAŁEK E., *Doświadczenia w zakresie wdrażania koncepcji Lean Manufacturing w małych firmach*, [w:] *Budowa maszyn i zarządzanie produkcją*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2007.
- [163] PAJAŁEK E., *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2006.
- [164] PEREDA J., HINCAPIE M., MOLINA A., *Product, Process and Manufacturing System Lifecycles Analysis for a Concurrent Development*, [w:] Product Lifecycle Management Conference, University in Seoul, 2008.
- [165] PEREZ-LUNO A., VALLE R., WIKLUND J., *Innovation and Imitation as Sources of Sustainable Competitive Advantage*, Management Research, Vol. 5, No. 2, 2007.
- [166] PI-FANG H., MIAO-HSUEH S., *Using the Theory of Constraints to Improve the Identification and Solution of Managerial Problems*, International Journal of Management, Vol. 22, No. 3, 2005.
- [167] PIOTROWSKI M., *Notacja modelowania procesów biznesowych – podstawy*, BTC, Legionowo, 2007.
- [168] PN-1078, *Techniki analizy niezawodności. Metoda schematów blokowych niezawodności*.
- [169] PN-80/N-0400, *Niezawodność w technice. Terminologia*.
- [170] POCHE Y., WOLSEY L.A., *Production Planning by Mixed Integer Programming*, Springer, New York, 2006.
- [171] Podręcznik Oslo, *Zasady gromadzenia i interpretacji danych dotyczących innowacji. Pomiar działalności naukowej i technicznej*, OECD i Eurostat (2008), MNiSW, Warszawa 2008, publikacja ze strony: <http://www.sourceoecd.org/scienceIT/9264013083> [dostęp: 29.09.2012].
- [172] POWIERŻA L., *Elementy inżynierii systemów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.
- [173] ROBERTSON N., PERERA T., *Feasibility for Automatic Data Collection*, [w:] Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2001.
- [174] ROBINSON S., GURKAN G., OZGE A., *Solving Stochastic Optimization Problems with stochastic Constrains: An Application in Network Design*, [w:] Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999.
- [175] *Rocznik Statystyczny Przemysłu 2011*, Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa, 2011.
- [176] ROTHER M., SHOOK L., *Naucz się widzieć. Eliminacja marnotrawstwa poprzez mapowanie strumienia wartości*, Wydawnictwo Lean Enetrprise Institute Polska, Wrocław, 2009.
- [177] ROUX O., JAMALI M., KADI D., CHATELET E., *Development of Simulation and Optimization Platform to Analyse Maintenance Policies Performance for Manufacturing Systems*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, No. 21, 2008.
- [178] RUTKOWSKA D., PILIŃSKI M., RUTKOWSKI L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, PWN, Warszawa, 1999.
- [179] RUTKOWSKI L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa, 2009.

- [180] RYDZAK F., CHLEBUS E., *Dynamic Model Based Resilience Analysis in Production Systems*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
- [181] RYNYIAK A., DZIUBA R., CHLEBUS E., BURDUK A., KOWALSKI A., *Optymalizacja procesów produkcyjnych w GKN Automotive Polska w Oleśnicy*, [w:] *Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [182] SADER B., SORENSEN C., *A New Technique for Modelling Production Control Schemes in Manufacturing Systems*, International Journal of Production Research, Vol. 48, No. 23, 2010.
- [183] SALA D., *Wspomaganie decyzji w procesach przygotowania produkcji z wykorzystaniem systemu ekspertowego*, rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Wiesław Waszkielewicz, Wydział Zarządzania AGH, Kraków, 2007.
- [184] SAŁACIŃSKI T., *SPC. Statystyczne sterowanie procesami produkcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [185] SKOŁUD B., KRENCZYK D., KALINOWSKI K., GRABOWIK C., ĆWIKAŁA G., CHLEBUS E., CHOLEWA M., CZAJKA J., *Zintegrowany system wspomagania produkcją w małych i średnich przedsiębiorstwach o zmiennej produkcji wieloasortymentowej na zlecenie*, Wydawnictwo Advert Studio, Gliwice, 2011.
- [186] SKOŁUD B., *Zarządzanie operacyjne. Produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
- [187] SKOŁUD B., *Planowanie wieloasortymentowej produkcji rytmicznej*, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe nr 136, Gliwice, 2000.
- [188] SRINOI Y., SHAYAN Z., GHOTB F., *A fuzzy Logic Modelling of Dynamic Scheduling in FMS*, International Journal of Production Research, Vol. 44, No. 11, 2006.
- [189] STANICKI T., *Teoria systemów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1975.
- [190] SUMNER M., *Enterprise Resource Planning*, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [191] SUSZ S., KOWALSKI A., BURDUK A., *Rapid Simulation Models*, [w:] *Rapid Production 2004. Innovating – knowledge – industry*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [192] SUSZ S., *Metodyka analizy i oceny zlecenia produkcyjnego na etapie technicznego przygotowania produkcji*, rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wrocław, 2003.
- [193] TADEUSIEWICZ R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1993.
- [194] TADEUSIEWICZ R., *Wstęp do sieci neuronowych*, [w:] *Sieci neuronowe*, pod red. W. Duch i in., AOW Exit, Warszawa, 2000.
- [195] TEWOLDEBERHAN T., VERBRAECK A., VALENTIN E., *An Evaluation and Selection Methodology for Discrete-Event Simulation Software*, [w:] *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Michigan, 2002.
- [196] VASUDEVAN K., DEVIKAR A., *Selecting Simulation Abstraction Levels in Simulation Models of Complex Manufacturing Systems*, [w:] *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Michigan, 2011.
- [197] VINODH S., *Axiomatic Modelling of Agile Production System Design*, International Journal of Production Research, Vol. 49, No. 11, 2011.
- [198] VLADIMIRS J., VITALIJS J., *Modelling the Behaviour of Stability of Production Systems of Economics*, Economics and Business, Vol. 22, 2012.
- [199] WANG J., SUN S., WANG D., YANG H., *Management and Control of Manufacturing Cells Based on Theory of Constrains*, [w:] *Computer Integrated Manufacturing Systems (CIMS)*, Vol. 12, No. 7, 2006.
- [200] WATERS D., *Zarządzanie operacyjne. Towary i usługi*, PWN, Warszawa, 2001.
- [201] WEISS Z., DIAKUM J., *Badanie symulacyjne systemu produkcyjnego jako proces inżynierii oprogramowania*, [w:] *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2011.

- [202] WEISS Z., DOSTATNI E., *Decyzje podejmowane w procesie projektowania wyrobu uwzględniające recycling*, [w:] *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2011.
- [203] WEISS Z., *Techniki komputerowe w przedsiębiorstwie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
- [204] WESTKÄMPER E., ZAHN E., *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen Das Stuttgarter Unternehmensmodell*, Springer, Heidelberg, 2008.
- [205] WESTKÄMPER E., *Crosser Borders between Policy and Industry – Strategies to Make European Industry More Sustainable*, [w:] 4th BMBF Forum for Sustainability, Leipzig, 2007.
- [206] WIECZOREK T., *Neuronowe modele procesów technologicznych*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
- [207] WIERZCHOWSKI L., GAJEWSKI E., KOWALSKI A., BURDUK A., CHLEBUS T., *Optymalizacja linii produkcji ram wózków w Bombardier Transportation Polska*, [w:] *Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [208] WOLNIAK R., SKOTNICKA-ZASADZIEN B., *Zarządzanie jakością dla inżynierów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010.
- [209] WOLNIAK R., SKOTNICKA B., *Metody i narzędzia zarządzania jakością*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
- [210] WRÓBLEWSKI K., *Podstawy sterowania przepływem produkcji*, WNT, Warszawa, 1993.
- [211] WRÓBLEWSKI K., KRAWCZYŃSKI R., KOSIERADZKA A., KASPRZYK S., *Reguły priorytetu w sterowaniu przepływem produkcji*, WNT, Warszawa, 1984.
- [212] YANG W., XIE S., ALZ Q., ZHOU Z., *Recent Development on Product Modelling: a Review*, International Journal of Production Research, Vol. 46, No. 21, 2008.
- [213] ZAHRA B., SAKLY A., BENREJEB M., *Stability Study Domain with Parameters Fluctuation of Mamdani Type Fuzzy Control Systems*, International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 3, No. 5, 2010.
- [214] ZDANOWICZ R., *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
- [215] ZDANOWICZ R., ŚWIDER J., *Modelowanie i symulacja systemów produkcyjnych w programie Enterprise Dynamics*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
- [216] ZIELAŚ A., *Statystyczne metody oceny ryzyka w działalności gospodarczej*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków, 1998.
- [217] ZIEMBA S., *Rola diagnostyki technicznej. Diagnostyka urządzeń mechanicznych*, Ossolineum, Wrocław, 1977.
- [218] ZUBRZYCKI J., SOBASZEK Ł., *Modelowanie matematyczne zagadnień inżynierskich w Matlabie*, [w:] *Zarządzanie procesami produkcyjnymi w przedsiębiorstwie*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2011.
- [219] ŻURADA J., BARSKI M., JĘDRUCH W., *Sztuczne sieci neuronowe*, PWN, Warszawa, 1996.
- [220] BUSINESS PROCESS MANAGEMENT INITIATIVE, *BPMN Implementors and Quotes*, http://www.bpmn.org/BPMN_Supporters.htm, 02.07.2012.
- [221] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> [dostęp: 23.09.2012].

SYSTEM MODELING AS A TOOL FOR EVALUATING THE STABILITY OF MANUFACTURING PROCESSES

In order to ensure smooth functioning of a production system, the stability of its processes must be guaranteed, while on the other hand it must be possible to make quick decisions encumbered with the lowest possible risk. Innovations concerning products or processes constitute a necessary condition to remain on the market, but they always carry the risk of losing the stability. The risk results from the uncertainty associated with making decisions as to the future, as well as from the fact that the implementation of innovations is one of the factors that disturb the current manner of operation of the enterprise. There are many methods and techniques for system modeling, while a broad range of advanced IT packages for process modeling is available in the market.

This monograph presents how the selected production system modeling methods have been used to ensure the stability of production processes and to implement these processes. The stability of a production system is defined as maintaining the steady state by the system for a certain assumed period of time. The problem of the stability of a production system has been considered in the context of its current functioning (operation) and development (reorganization).

Production system modeling allows ensuring the stability of a production system through: understanding and assessing the impact of the decisions made on the production system and its various functional areas, designing or reorganizing the production system in a manner that does not disturb its current and future operation, controlling the production system by selecting the parameters of system inputs so as to obtain the designed values of the output parameters, as well as identifying, assessing and eliminating the impact of the factors that disturb correct functioning of the production system.

In addition, a concept of combining the simulation models and artificial neural network models has been proposed. A model of a hybrid expert system, which uses fuzzy inference, has been developed to assess the possibility of attaining of the assumed goals (production plans). The proposed hybrid model will allow assessing the feasibility of the implementation of the assumed goal, depending on the extent of the risk or the production system stability level, and making quick decisions as to the validity of the organizational changes to be introduced. Application of the fuzzy inference method allows drawing conclusions using the rules based on linguistic values.