

WYDZIAŁ INŻYNIERII ZARZĄDZANIA
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

METODYKA BADAŃ EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACJI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PRZEDSIĘBIORSTWACH BRANŻY MEBLARSKIEJ

FURNITURE INDUSTRY COMPLEX TECHNICAL SYSTEM EFFECTIVNESS AND OPERATION METHODOLOGY

mgr Katarzyna SZWEDZKA

Promotor:
prof. dr hab. inż. Edwin TYTYK

Promotor pomocniczy:
dr inż. Małgorzata JASIULEWICZ-KACZMAREK

Poznań 2019

Dedykuję:
Córce Anastazji

Panu profesorowi dr hab. inż. Edwinowi TYTYKOWI składam serdeczne podziękowania za cenne uwagi i pomoc przy realizacji niniejszej rozprawy.

Panu profesorowi dr hab. Franciszkowi GRABSKIEMU składam serdeczne podziękowania za cenne uwagi i pomoc w budowie modelu opartego o procesy semi–Markowa.

Panu profesorowi dr hab. Czesławowi CEMPLOWI składam serdeczne podziękowania za wieloletnią cierpliwość i wyrozumiałość w kształtowaniu mojej wiedzy z zakresu eksploatacji systemów technicznych.

Pani dr inż. Małgorzacie JASIULEWICZ–KACZMAREK składam serdeczne podziękowania za jej wieloletni wkład i zaangażowanie w mój rozwój naukowy.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE 5

SUMMARY 7

SYMBOLE I SKRÓTY 8

1 WPROWADZENIE 10

1.1 Zarys problemu 10

1.2 Cel badawczy 13

1.3 Koncepcja rozwiązania problemu 15

2 TEORETYCZNE PODSTAWY PROBLEMATYKI BADAŃ 18

2.1 System techniczny jako obiekt badań 18

2.1.1 Pojęcie systemu technicznego 18

2.1.2 Niezawodność systemu technicznego 23

2.1.3 Cykl życia systemu technicznego 35

2.2 Eksploatacja systemów technicznych 37

2.2.1 Pojęcie i cele eksploatacji systemów technicznych 37

2.2.2 Procesy eksploatacji systemów technicznych 41

2.2.3 Strategie eksploatacji systemów technicznych 44

2.3 Ocena efektywności eksploatacji systemu technicznego 46

2.3.1 Pojęcie efektywności eksploatacji systemów technicznych 46

2.3.2 Dane i informacje dotyczące efektywności eksploatacji 50

2.3.3 Miary efektywności eksploatacji systemów technicznych 52

2.4 Modele efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych 62

2.4.1 Definicja modelu i modelowania 62

2.4.2 Modele matematyczne procesów eksploatacji systemów technicznych 65

2.4.3 Procesy Markowa i semi-Markowa 68

3 BADANIA WSTĘPNE EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACJI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PRZEDSIĘBIORSTWACH BRANŻY MEBLARSKIEJ 79

3.1 Identyfikacja przedsiębiorstwa 79
3.2 Charakterystyka badanego systemu technicznego 80
3.2.1 Proces wytwarzania mebli skrzyniowych 80
3.2.2 Charakterystyka techniczna złożonych systemów produkcyjnych w przedsiębiorstwach branży meblarskiej – centrów obróbczych 84
3.2.3 Koszty awarii 94
3.3 Metody oceny efektywności eksploatacji stosowane w badanych przedsiębiorstwach 96
3.3.1 Znaczenie badań wstępnych 96
3.3.2 Wskaźnik OEE i jego wykorzystanie 96
3.3.3 Metody raportowania występujących przestojów 99
3.3.4 Koncepcja nowego raportowania stanów niezdatności 101
3.3.5 Wpływ masy produkowanych elementów na występowanie mikro–awarii 104
3.4 Wnioski z badań wstępnych 107
4 MODEL OCENY EFEKTYWNOŚCI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH 109
4.1 Określenie przedziałów czasów zdatności do wystąpienia odnowy systemu 109
4.2 Procesy semi–Markowa jako podstawa do konstrukcji modelu 116
4.3 Charakterystyki niezawodnościowe modelu 120
4.4 Dyskusja wyników badań 136
5 PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ 140
BIBLIOGRAFIA 144
Spis tabel 152
Spis rysunków 154

STRESZCZENIE

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie modelu eksploatacji złożonych systemów technicznych w przemyśle meblarskim. Do przeprowadzonych badań wybrano jednego ze światowych liderów specjalizującego się w seryjnej produkcji produktów przeznaczonych do samodzielnego montażu. Firma nieustanie się rozwija zarówno, jeżeli chodzi o najnowsze technologie jak i liczbę własnych fabryk w Polsce i na świecie. Treść rozprawy składa się z pięciu rozdziałów, spisu rysunków, tabel oraz spisu literatury.

W rozdziale pierwszym przeprowadzono wprowadzenie do problematyki efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych jakim jest nowoczesne centrum obróbcze oraz jego wpływu na przestoje w wyniku awarii. Podjęto się uzasadnienia tematu dysertacji oraz postawiono pytania badawcze i cel pracy. W końcowej części rozdziału podano koncepcję rozwiązania problemu.

W rozdziale drugim podany został ogląd literatury przedmiotu i jej analiza pod kątem badanej problematyki. Omówiono definicje, cel i zakres zagadnień związanych z systemami technicznymi oraz jego cykl życia. Następnie omówiono pojęcia związane z eksploatacją, niezawodnością i efektywnością systemów technicznych. W ostatniej części rozdziału przeanalizowano modele procesów eksploatacji ze szczególnym wyróżnieniem procesów semi–Markowa, które posłużyły do prowadzenia badań.

W rozdziale trzecim opisano sektor badawczy skoncentrowany na seryjnej produkcji mebli, wybrany do celu badań obiekt techniczny, stosowane metody ogólnego pomiaru przestojów w dwóch zakładach produkcyjnych dla czterech złożonych systemów technicznych, koszty zatrzymania centrum obróbczego oraz autorską koncepcje wskazującą powtarzalność występowania zdarzeń identyfikowanych jako mikro–awarie celem oceny prawdopodobieństwa ich występowania

W rozdziale czwartym przedstawione zostały założenia do modelowania procesów semi–Markowa oraz sposób pozyskania pełnej informacji o występujących stanach zdatności i niezdatności. W dalszej części opisano wyniki badań odnoszące się do prawdopodobieństwa z w jakim może poprawnie realizować zadania centrum obróbcze o strukturze szeregowej. Zbadano

także wpływ masy produkowanych elementów na występowanie stanów niezdatności. Na koniec rozdziału przedstawiono wnioski.

W rozdziale piątym przedstawiono wnioski i kierunki dalszych badań.

Słowa kluczowe:
system techniczny, efektywność, eksploatacja, niezawodność systemów, procesy stochastyczne, struktura szeregowa systemu

SUMMARY

The aim of this research is to develop a methodology for the analysis of complex production systems in the furniture industry. For the purpose of the research the world's leader that designs and sells ready-to-assemble furniture was selected as the sample and data source. This company constantly develops new technologies and builds new factories all around the world. In the thesis there are five chapters and the analysis is supported by numerous drawings, tables and the literature review.

The first chapter focuses on the issues of the effectiveness for complex processes in relation to the number of plant failures and production outages. This justifies the definition of the problem and defines the topic for this thesis. In the last part of this chapter a potential solution to the above issue is proposed.

The literature review is summarized in the second chapter. The definition, the aim and other areas related to complex production processes are also described. Furthermore, topics related to the operation, reliability and efficiency of those processes are discussed. In the last part of this chapter different models used for the analysis of complex production systems are presented, with the main one being the semi-Markov model.

The third chapter describes the research industry that focuses on the complex production systems. Additionally, methods used for the estimation of the downtime and the associated cost on two production lines in for four complex production processes is discussed. Finally, the cost of downtime and the concept that demonstrates the relationship between the recurrence of incidents defined as mico-break-down and their probability is discussed.

The next chapter presents the assumptions used to model semi-Markov processes and the method used to obtain the full information about the frequency of break-downs. Next part talks about research results that were used to predict the probability of break-downs using semi-Markov processes for systems with the serial structure. Also, the impact of the weight of different elements produced on the failure frequency of processes was analyzed. The final chapter gives the conclusion and talks about the future work.

Key words:

technical system, efficiency, operation, reliability of systems, stochastic systems, serial structure of systems.

SYMBOLE I SKRÓTY

A	-	zbiór systemu
A	-	gotowość
A_o	-	miara gotowości operacyjnej
A_t	-	miara gotowości technicznej
B	-	zbiór borelowski
CEN	-	Europejski Komitet Normalizacji
D	-	wskaźnik dostępności
$O(T)$	-	odchylenie standardowe czasu zdatności systemu dwustanowego
E	-	zbiór elementów systemu
$E(T)$	-	średni czas zdatności systemu dwustanowego
e_i	-	stany niezawodnościowe w strukturze szeregowej systemu
E_n	-	podzbiór systemu
$f(t)$	-	funkcja gęstości prawdopodobieństwa
$F(t)$	-	dystrybuanta czasu zdatności
J	-	wskaźnik jakości
KPI	-	finansowy i niefinansowy wskaźnik efektywności (ang. Key Performance Indicators)
$\lambda(\tau)$	-	funkcja ryzyka/ intensywność uszkodzeń
MTBF	-	średni czas pomiędzy niezdatnością systemu (ang. Mean Time Between Failure)
MTTF	-	średni czas do wystąpienia awarii systemu (ang. Mean Time To Failure)
MTTR	-	średni czas odnowy systemu (ang. Mean Time To Repair)
N	-	całkowita liczba pomiarów
n	-	liczba pomiarów po czasie t
O	-	wskaźnik wykorzystania
OEE	-	całkowita efektywność wyposażenia (ang. Overall Equipment Efectiveness)
P	-	prawdopodobieństwo zdarzenia
q	-	rozkład graniczny
$Q(t)$	-	funkcja jądra odnowy
$R(t)$	-	funkcja niezawodności
R_n	-	relacje podsystemu
S	-	System
S_0	-	stan zdatności systemu
S_1	-	stan niezdatności zdatności systemu
SM	-	proces semi–Markowa
SS_n	-	dekompozycja systemu
T	-	czas zdatności systemu dwustanowego
t_0	-	czas rozpoczęcia procesu
t_k	-	czas do chwili wystąpienia awarii
t_n	-	przedział czasu
TPM	-	utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (ang. Total Productive

		Maintenance)
$V(t)$	-	wariancja czasu zdatności
W_n	-	własność jako cecha indentyfikacyjna podsystemu ze względu na relacje i jakość innego systemu
$X(t)$	-	zmienna losowa
$X_0, X_1, \ldots$	-	ciąg zmiennych losowych
$\{X(t): t \in T\}$	-	zmienne losowe procesu stochastycznego o zbiorze stanów
$\Lambda(t)$	-	funkcja skumulowanej intensywności uszkodzeń
Ω		przestrzeń zdarzeń elementarnych

1 WPROWADZENIE

1.1 Zarys problemu

Przemysł meblarski ma w Polsce długą tradycję i od dziesiątków lat stanowi ważną gałąź gospodarki. Zmiany, jakie zaszły w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, zapoczątkowały dynamiczny rozwój działalności tej branży. Duże zakłady w większości zostały przejęte przez zagraniczny kapitał, a mniejsze przedsiębiorstwa starały się dostosować się do funkcjonowania w nowych warunkach. Wskutek globalizacji znaczenia nabrała elastyczność produktowa i procesowa, czyli zdolność do dostosowania się do zmieniających się oczekiwań klientów oraz zmian związanych bezpośrednio z technologią wytwarzania (Dyba i Stryjakiewicz, 2014).

Oprócz wysokiej sprawności technologicznej i produkcyjnej, oczekuje się wysokiego poziomu niezawodności posiadanych parków maszynowych przez eliminację występowania stanów niezdatności, wstrzymujących przepływ materiałów w trakcie procesu produkcyjnego. Sam proces technologiczny w przedsiębiorstwach seryjnie produkujących meble wymaga użycia specjalistycznych maszyn i urządzeń, dostosowanych do specyfiki wyrobów. Wymienione obiekty określa się jako centra obróbcze (Dietrich, 1985) w których jednocześnie realizowane są funkcje robocze, będące efektem sprzężonych ze sobą procesów roboczych i pomocniczych, przebiegających w różnych połączonych ze sobą maszynach i urządzeniach, które są eksploatowane przez specjalistyczny personel. Do zadań centra obróbczego należy uzyskiwanie z przetwarzanego materiału (elementu z drewna litego) przedmiotu o żądanym kształcie, wymiarze, dokładności i chropowatości powierzchni, a także wywierconych otworach okrągłych przelotowych i nieprzelotowych, o kształcie (walec, stożek) i średnicy uzależnionej od typu zastosowanego wiertła lub freza (Bajkowski, i in., 1988), (Karpiński, 2013).

Na potrzeby realizacji rozprawy, badania przeprowadzono w jednym z przedsiębiorstw należącym do czołowych liderów seryjnie produkujących meble z drewna litego, który nieustanie się rozwija zarówno pod względem tworzenia i wykorzystywania najnowszych technologii wytwarzania, stosowania najnowszych metod zarzadzania eksploatacją parków maszynowych, uzyskiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych produkowanych wyrobów, a także ekspansji na cały świat i otwieraniem kolejnych fabryk produkcyjnych. Stawiane wymagania względem linii produkcyjnych dotyczą skrócenia czasu technologicznego, zmniejszenia pracochłonności wykonania, obniżenia całkowitych kosztów eksploatacji, przy jednoczesnym zapewnieniu jakości i powtarzalności produkowanych wyrobów. Kluczowym celem działania takiego systemu technicznego jest jego zdolność do realizacji przypisywanych mu zadań. W celu oceny efek-

tywności stosowanych w przedsiębiorstwach działań doskonalących, tworzy się system pomiaru osiągnięć przy pomocy różnorodnych miar i wskaźników. Miary te służą do oceny kluczowych działań realizowanych w różnych obszarach funkcjonalnych przedsiębiorstwa oraz wskazują na ich efektywność w odniesieniu do założonych celów organizacji. W odniesieniu do centrów obróbczych zakłada się ocenę systemu przystępującego do działania przy założeniu, że system będzie zdolny do realizacji funkcji, oraz że w trakcie realizacji zadań system nie ulegnie uszkodzeniu.

Przedsiębiorstwo, chcąc terminowo realizować plan produkcyjny, musi założyć, że przepływ materiałów będzie odbywał się zgodnie z przyjętym harmonogramem postępowania w określonym czasie i w oparciu o wyznaczone do tego surowce. W przypadku masowej produkcji jest dość trudno w krótkim czasie zmienić asortyment ze względu na wysokie koszty magazynowania materiałów przeznaczonych do produkcji i czas dostarczenia surowców potrzebnych do uzyskania wyrobu finalnego. Istotne jest również samo przygotowanie wymaganych narzędzi pomocniczych, jak np. frezy, głowice, wiertła oraz części zamiennych. Produkcja wielotysięcznych serii w krótkim czasie, choć optymalna dla takich linii produkcyjnych, stanowi pewne ograniczenia w postaci zamrożonego kapitału i podpisanych umów na planowanie dostaw surowców (np. płyty z klejonki sosnowej o określonym kształcie, wymiarze i przeznaczeniu), oraz pozostałych materiałów i narzędzi niezbędnych do wyprodukowania mebli. Terminowość realizacji planu produkcyjnego, dotyczy także problemów wewnętrznych produkcji, związanych z dostępnością centrum obróbczego i jego późniejszym zablokowaniu przez wyroby realizowane zgodnie z wcześniej przyjętym planem produkcyjnym. W przypadku wystąpienia awarii na maszynie przeznaczonej do realizacji zdefiniowanego procesu technologicznego, dochodzi do przestojów (braku przetwarzania materiału), a co za tym idzie, strat związanych z kapitałem ludzkim i niepełnym wykorzystaniem maszyn na pozostałych liniach produkcyjnych. Stopień złożoności centrum obróbczego oraz jego właściwa instalacja i montaż (np. połączenie w jedną linię, dostęp do wyciągów, zajęcie powierzchni produkcyjnej, masa maszyny, czas montażu obiektu) uniemożliwiają choćby chwilową instalację obiektu zastępczego w przypadku wystąpienia awarii. Tego typu centra obróbcze charakteryzuje brak rezerwy w postaci odrębnych maszyn. W praktyce produkcyjnej inwestycja w nową maszynę jest tylko cząstkowym kosztem. Istotnym jest zapewnienie odpowiedniej przestrzeni z zachowaniem wszelkich norm bezpieczeństwa oraz jej przyłączenie do sieci.

Zapewnienie wysokiej efektywności działania złożonych systemów technicznych jest możliwe, jeśli decyzje dotyczące zarządzania eksploatacją takich obiektów są racjonalne i oparte o wiarygodne dane, zapisywane rzetelnie przez operatorów i pracowników utrzymania

ruchu. W oparciu o te zapisy możliwe jest wiarygodne odwzorowanie rzeczywistego systemu technicznego za pomocą modelu. Model powinien umożliwiać poznanie oraz analizę badanego systemu i procesów na takim poziomie szczegółowości, aby możliwe było opracowanie racjonalnych i efektywnych metod sterowania działaniami realizowanych na tych systemach. Wśród istotnych czynników umożliwiających badanie realizowanych procesów eksploatacji są: stopień adekwatności modelu do w stosunku do rzeczywistego systemu technicznego, przyjęty stopień szczegółowości, zastosowany aparat matematyczny, możliwość akceptacji przyjętych założeń, uproszczeń oraz ograniczeń uwzględniających cel badań (Migawa, 2013)

Wykorzystywane metody matematyczne do modelowania procesu eksploatacji systemów technicznych zależnych od ich złożoności bazują na określeniu założeń, które pozwalają zbudować matematyczny model opisujący przejście stanów modelowanego procesu odwzorowującego rzeczywisty proces. Często do modelowania rzeczywistych procesów eksploatacji systemów technicznych opisujących zakres stanów eksploatacyjnych stosuje się procesy stochastyczne, w tym np. procesy Markowa i semi–Markowa (SM) [1].

Ocena niezawodnościowa systemów technicznych za pomocą semi–markowskich metod została opisana między innymi w pracach badawczych (Chrzan, 1990; Cinlar, 1975; Feller, 1964; Fleming i Soner, 1993; Grabski, 2002; Grabski i Jaźwiński, 2009; Grabski i Jaźwiński, 2003; Iosifescu, 1988, Migawa, 2013, Limnios i Oprisan, 2001). Choć procesy Markowa i semi–Markowa są opisywane w literaturze, to występuje brak wykorzystania tych procesów w budowie modelu dotyczącego efektywności eksploatacyjnej złożonych systemów technicznych w przemyśle meblarskim, które przeznaczone są do masowej produkcji mebli. Chcąc efektywnie określić różne charakterystyki procesu eksploatacji, należy przyjąć upraszczające założenia. Jednym z takich uproszczeń podczas modelowania systemu technicznego może być brak pamięci w chwilach zmian stanu systemu, co oznacza, że przejście z jednego stanu do innego nie będzie zależało od tego, w jakim stanie do tej pory przebywał obiekt. Jeżeli przebywanie systemu w określonym stanie jest nieujemną zmienną losową o rozkładzie wykładniczym, to proces, przyjmuje postać procesu Markowa (Migawa, 2004). Jeśli zmienne losowe posiadają rozkłady dowolne (ze względu na ograniczenia procesów Markowa) to proces będzie procesem

[1] przedmiotem procesów semi–Markowa są zdarzenia losowe (opisujące stany w których znajduje się złożony system techniczny), gdzie zakładając, że w danym momencie czasu proces znajdował się w jednym ze stanów, to przejście do innego stanu będzie zmienną losową o dowolnym rozkładzie. Uzasadnienie wykorzystania teorii procesów stochastycznych, w tym procesów Markowa i semi–Markowa w rozprawie odwzorowującej rzeczywisty obiekt, opisano w rozdziałach 2.1.2, 2.4.2 i 2.4.3.

semi–Markowa (SM) (Grabski, 2002). Modele SM umożliwiają budowanie modeli matematycznych niezawodności systemów technicznych, dla których czasy pozostawania w stanach modelowanego systemu różnią się typem rozkładu (Charzan, 1990).

W literaturze znajdujemy szeroki opis pojęcia efektywności eksploatacyjnej złożonych systemów technicznych, jednak występują braki w zakresie koncepcji metodycznych centrów obróbczych (*linii technologicznych*) w produkcji mebli. Nieobecność tematu (*problemu*) w piśmiennictwie naukowym wynika przede wszystkim z braku dostępu do metod i technik wykorzystywanych przez przedsiębiorstwa w ocenie eksploatacyjnej własnych linii produkcyjnych. Luka w tym obszarze spowodowana jest także tym, że złożone systemy techniczne w większości dotyczą dużych przedsiębiorstw z zagranicznym kapitałem. Wobec powyższych czynników, autor uważa za celowe dokonanie analizy awarii wpływających na efektywności eksploatowanych systemów technicznych w przemyśle meblarskim. Źródłem inspiracji do badań było kilkunastoletnie doświadczenie w zarządzaniu produkcją mebli w kraju i Europie. Podjęta próba badania awarii z poziomu technicznego z wykorzystaniem metod matematycznych za pomocą procesów semi–Markowa, może wskazać prawdopodobieństwo przejść ze stanu zdatności do niezdatności i odwrotnie i być istotną informacją dla przedsiębiorstwa, a także poszerzyć wiedzę naukową z zakresu funkcjonowania linii produkcyjnych jako złożonych systemów technicznych.

1.2 Cel badawczy

Na podstawie analizy dostępnej literatury oraz informacji o obiekcie badań zostały przyjęte następujące założenia badawcze:

- efektywność eksploatacyjna centrów obróbczych ma istotny wpływ na ciągłość procesu technologicznego w przedsiębiorstwach seryjnie produkujących meble;
- istnieje możliwość wyznaczenia prawdopodobieństwa występowania awarii elementów złożonego systemu technicznego;
- w oparciu o dostępne dane statystyczne, jest możliwe wyznaczenie maksymalnego czasu pracy systemu technicznego do wystąpienia awarii oraz wyznaczenie tychże samych czasów dla elementów tego systemu;
- jest możliwe wskazanie, który przedział masy produkowanych elementów będzie miał istotny wpływ na występowanie awarii, a co za tym idzie, opóźnienia w realizacji planu produkcyjnego;
- dane ilościowe o realizacji zlecenia produkcyjnego powinny wynikać z prawdopodobieństwa dostępnego czasu systemu technicznego do wystąpienia awarii;

- normy odnoszące się do liczby produkowanych elementów w określonej jednostce czasu powinny uwzględniać ich jednostkową masę.

Analiza eksploatacji złożonych systemów technicznych w przemyśle meblarskim skłania do tego, aby postawić pytanie o możliwość zbudowania modelu wspomagającego procesy decyzyjne w ramach wybranego obszaru badań. W wyniku prowadzonych badań literaturowych najbardziej odpowiednim podejściem do oceny prezentowanego zagadnienia skoncentrowanego na modelu zarządzania eksploatacją centr obróbczych okazało się zastosowanie kryterium efektywności technicznej.

Dążąc do tego aby zrealizować cel, postawiono następujące pytania badawcze:

1. Jakie czynniki wpływają na stan niezdatności maszyn?
2. Jakie dane są niezbędne do wyznaczenia efektywności eksploatacyjnej maszyn użytkowanych w produkcji mebli?
3. Jak te dane wykorzystać do podnoszenia efektywności w planowaniu eksploatacji złożonych systemów technicznych?

Wiedza o możliwościach eksploatacyjnych złożonych systemów technicznych oraz trafna interpretacja pozyskanych danych może pozwolić w przyszłości na skuteczniejsze planowanie prac serwisowych oraz efektywniejsze zarządzanie czasem eksploatowanych obiektów (Kosicka, i in., 2006). Według doświadczeń autora pracy, prowadzone regularne czynności serwisowe centrów obróbczych nie eliminują awarii mechanicznych występujących na elementach systemu technicznego. Należy uwzględnić w obserwacji bezpośredni wpływ poddanego obróbce materiału, który w przypadku indywidualnych właściwości lub oddziaływań zewnętrznych, takich jak zadany proces technologiczny, może wpływać na stan techniczny obiektu. Należy również dokładnie określić, czym jest awaria techniczna i jaki może być czas jej trwania, w celu dokonywania nieregularnej, a jednocześnie skutecznej konserwacji, uzależnionej od realizacji planu produkcji (Linquist, 2010; Ratnayake, 2013). Mimo, iż plany produkcyjne o charakterze krótkoterminowym ulegają zmianom i modyfikacjom, to w dłuższym okresie czasu proces produkcyjny mebli planuje się z minimum półrocznym wyprzedzeniem. Wobec powyższego, autor niniejszej pracy przyjmuje wytyczne dla budowy modelu oraz stawia sobie następujący cel naukowy rozprawy:

Opracowanie modelu zarządzania eksploatacją złożonego systemu technicznego, umożliwiającego podejmowanie decyzji ukierunkowanych na ograniczenie strat produkcyjnych, których źródłem są awarie.

Budowa tego modelu umożliwi określenie zależności występujących pomiędzy elementami systemu technicznego i ich wpływ na występowanie awarii technicznych. W rozprawie przyjęto następujące badawcze cele szczegółowe:

Cel I: Identyfikowanie strat techniczno-ekonomicznych i przyczyn ich powstawania w eksploatacji złożonych systemów technicznych w przemyśle meblarskim.

Cel II: Określenie zależności pomiędzy elementami systemu technicznego, a częstotliwością wystąpienia awarii z poziomu technicznego na centrum obróbczym.

Cel III: Opracowanie wytycznych do wdrożenia nowej koncepcji.

Biorąc pod uwagę powyższe cele, a także wstępną analizę źródeł literaturowych można stwierdzić, że tradycyjne modele oceny eksploatacji złożonych systemów technicznych nie odnoszą się do oceny centrów obróbczych używanych przy seryjnej produkcji mebli, których jakość stanowi główny wyznacznik konkurencyjności branży meblarskiej na rynku globalnym.

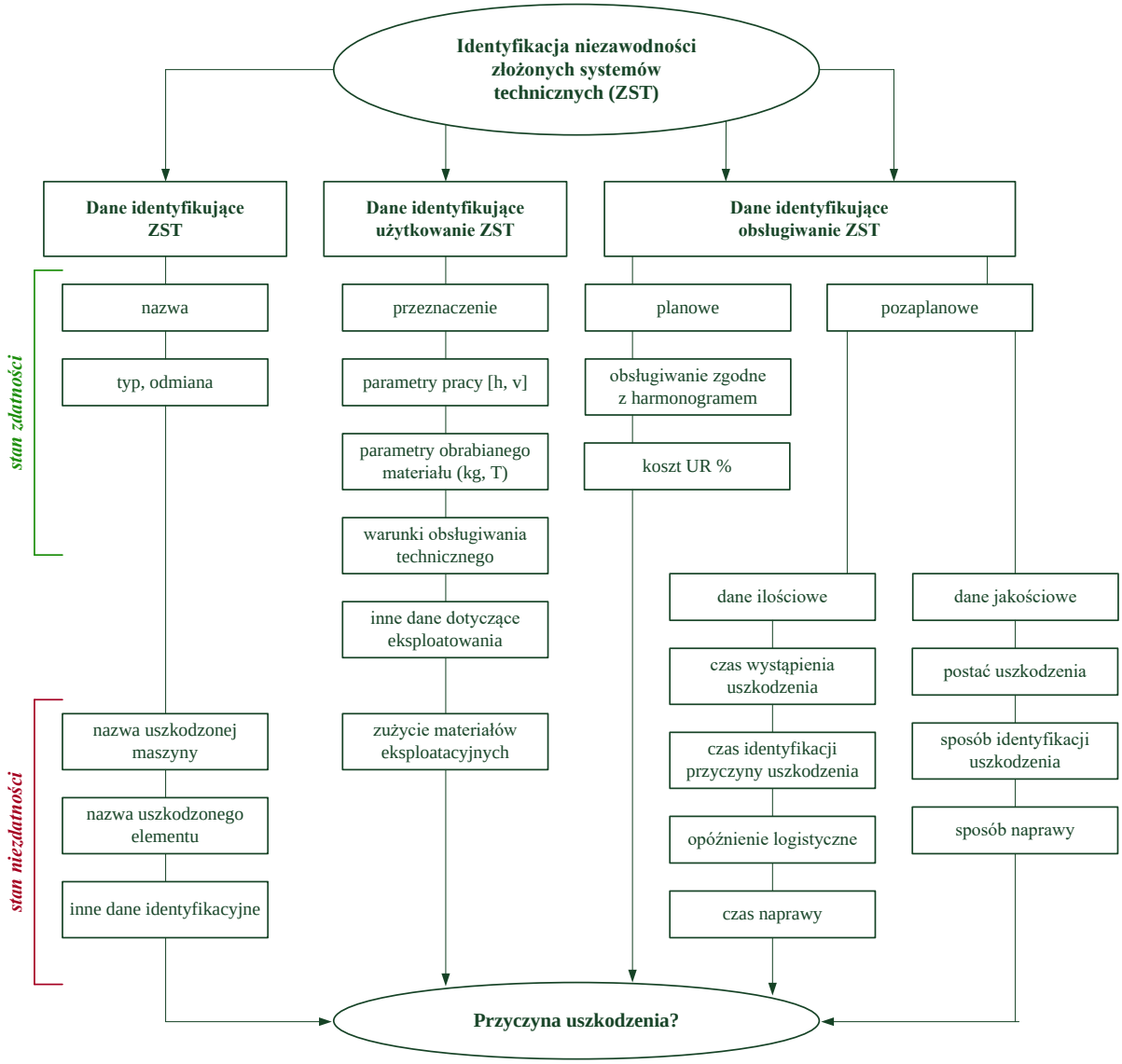
Celem utylitarnym rozprawy jest opracowania modelu niezawodności odnoszącego się do zagadnień związanych z zarządzaniem eksploatacją systemów technicznych w dwóch przedsiębiorstwach produkujących meble w celu poprawy ich efektywności. Założenia zawarte w modelu wskażą rzeczywistą niezawodność, ponieważ otrzymane dane statystyczne stanowią kompletną wiedzę o wszelkich działaniach podejmowanych w okresie dwóch lat eksploatacji. Na podstawie opracowanego modelu, możliwe będzie wyznaczenie prawdopodobieństwa występowania awarii badanego systemu oraz jego elementów z zakresu przestojów i realizacji planu produkcyjnego. Opracowanie powyższego modelu niezawodności może umożliwić przyjęcie nowego sposobu oceny czasu zdatności badanego systemu technicznego[2] oraz określenie prawdopodobieństw zmian jego stanu (przejść ze stanu zdatności do stanu niezdatności)[3].

1.3 Koncepcja rozwiązania problemu

W pracy badawczej autor skoncentrował się na ocenie funkcjonalnej czterech złożonych systemów technicznych. Systemy te pracują z porównywalną prędkością przesuwu materiału i podobnym rodzajem produkowanego asortymentu. Pozyskanie danych ilościowych wiąże się z dostępem do danych jakościowych z zakresu eksploatacji zarządczej w przedsiębiorstwach. Przyjęto, że dzięki zebranym informacjom możliwa stanie się konstrukcja modelu oceny funkcjonalnej ze wskazaniem prawdopodobieństwa występowania awarii technicznych. Algorytm pozyskiwania danych historycznych oraz strategie eksploatacji przedstawiono na rysunku 1.1.

[2] Charakterystykę obiektu badań oraz propozycje wyznaczenia miar oceny niezawodności systemu technicznego opisano w rozdziale trzecim.

[3] Model oceny efektywności zawarto w rozdziale czwartym.



Rysunek 1.1. Algorytm pozyskiwania danych o złożonych systemach technicznych (*Źródło: opracowanie własne na podstawie: Żółtowski, 1996*)

Na podstawie zgromadzonych informacji, zgodnie z powyższym algorytmem (rys.1.1.), możliwe będzie opracowanie semi–markowskiego modelu niezawodności rozpatrywanego systemu technicznego. Realizacja badań będzie zawierała następujące etapy:

1. Badanie dostępnej literatury związanej z przedmiotem rozprawy.
2. Wybór obszaru badań.
3. Identyfikacja wybranego obiektu badań (nazwa, typ i odmiana, przeznaczenie, parametry pracy systemu i procesu technologicznego, metody obsługi: planowe i pozaplanowe).
4. Zebranie danych dotyczących awarii obiektu badań (nazwa uszkodzonej maszyny będącej elementem systemu technicznego, nazwa uszkodzonej części, przyczyna uszkodzenia, czas do uszkodzenia i prowadzonej naprawy, sposoby prowadzonych napraw).

5. Zebranie danych dotyczących liczby produkowanych elementów dla wybranego systemu technicznego.
6. Przeprowadzenie szczegółowej analizy z zakresu wszystkich przestojów, a następnie wyszczególnienie awarii technicznych w stosunku do całkowitego dostępnego czasu.
7. Budowa semi–markowskiego modelu niezawodności eksploatacji rozpatrywanego systemu technicznego.
8. Wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia stanu niezdatności dla wybranej grupy złożonych systemów technicznych przeznaczonych do obróbki drewna.

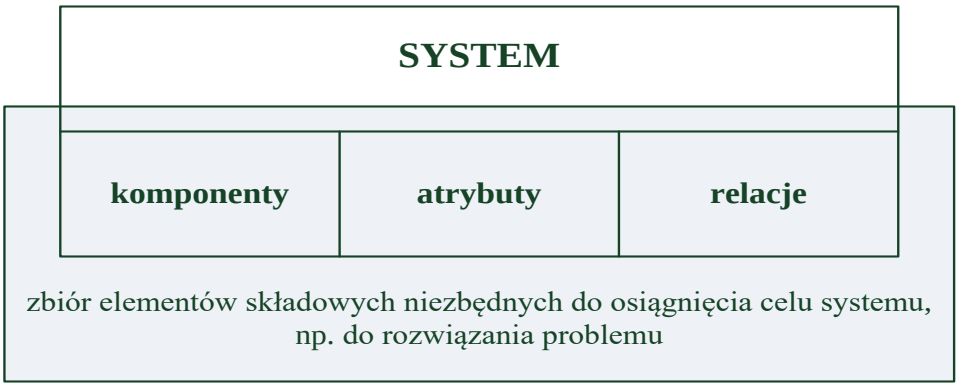
2 TEORETYCZNE PODSTAWY PROBLEMATYKI BADAŃ

2.1 System techniczny jako obiekt badań

2.1.1 Pojęcie systemu technicznego

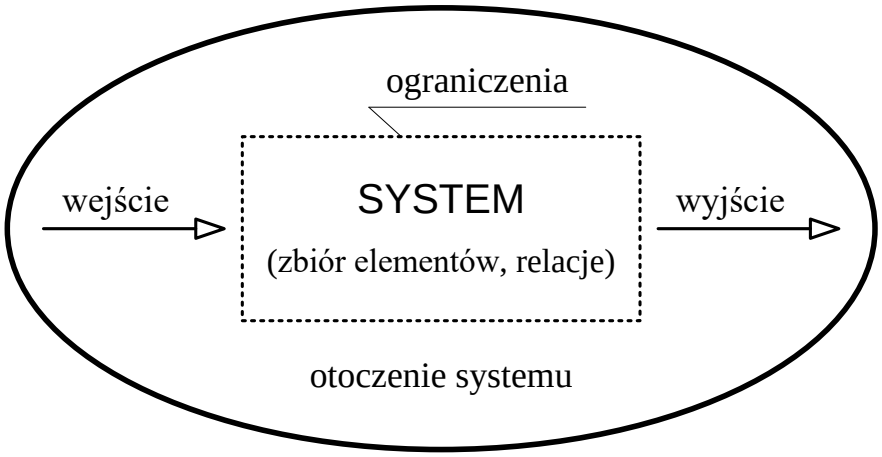
Rozważania dotyczące efektywności eksploatacyjnej złożonych systemów technicznych, w pierwszej kolejności wymagają sprecyzowania pojęcia systemu oraz systemu technicznego.

Często cytowaną definicję systemu sprecyzował biolog Ludwik von Bertalanffy (1901 – 1972) w latach 30 ubiegłego stulecia (Chybowski, 2014). System opisuje jako obiekt, realizujący określoną funkcję przy pomocy zbioru współdziałających elementów. Aby system mógł egzystować, tworząc przez to zorganizowaną całość, należy wyróżnić co najmniej trzy elementy, które współdziałają ze sobą w określonym celu, np.: *strukturę – proces – regulację* (*przyczynowość*), lub: *materia* (*tworzywo*) – *proces* (*z jego regulacją*) – *forma* (*struktura lub organizacja*) (Cempel, 2008). Przykładowe elementy systemu pokazano na rysunku 2.1.



Rysunek. 2.1. Przykładowe elementy systemu. (*Źródło: opracowanie na podstawie: Tarełko, 2011*)

Każdy system podlega oddziaływaniu określonego otoczenia (bliższego i dalszego), którym mogą być inne systemy i jednocześnie każdy z tych systemów wpływa na ukształtowanie się swojego otoczenia – budując relacje obustronne. Działanie systemu polega na celowym zmienianiu parametrów wejściowych na oczekiwane wartości parametrów wyjściowych. Wpływ otoczenia na rozpatrywany system określa się jako wejście a oddziaływanie systemu na otoczenie jako wyjście. Ogólny schemat graficzny systemu, przedstawiono na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2. Graficzna interpretacja systemu.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie: Tarełko, 2011*)

Opis zewnętrzny, zwany metodą czarnej skrzynki, polega na zdefiniowaniu zbioru wejść i wyjść systemu, które mogą być interpretowane jako zbiór argumentów i wartości funkcji przejścia. Natomiast opis wewnętrzny formułowany przez dążenie do celu rozróżnia wejścia i wyjścia systemu. Zachowanie systemu opisane jest w kategoriach procesu dążenia do celu, czyli tak, aby system reagował na dany bodziec w sposób prowadzący do osiągnięcia zamierzonego celu lub wykonania zadania (Tarełko, 2011).

W literaturze można znaleźć różnorodność definiowania i interpretacji pojęcia systemu. Sadowski wyliczył, że są trzydzieści cztery definicje tego pojęcia (Sadowski, 1978). W tabeli 2.1 przedstawiono wybrane definicje systemu sformułowane przez klasyków i współczesnych autorytetów.

W niniejszej rozprawie przyjęto definicję systemu technicznego Dietrycha (1985, s. 51), która brzmi następująco: „***system techniczny jest własnością układu sprzężonych środków technicznych, umożliwiających przekształcenie masy, energii i informacji”.***

Przyjęta definicja, w rozumieniu autora rozprawy, w takim ujęciu obejmuje własności wszelkich układów, w których realizuje się złożone działania przekształcające, które można przedstawić za pomocą działań matematycznych, których rezultatem będzie informacja zapisana przy pomocy odpowiednich znaków.

Tabela 2.1 Wybrane definicje systemu. *(Źródło: Opracowanie własne na podstawie Bertalanffy, 1984; Pabis, 2009; Hall, 1968; Klir, 1976; Golka, 1992; Kamiński 1973; Białyszewski, 1972; Cempel, 2008; Matuszak, 2012; Żółtowski, 2004)*

Lp.	Autor	Definicja
1	Bertalanffy L.	Zbiór elementów pozostający we wzajemnym oddziaływaniu między sobą a otoczeniem.
2	Pabis S.	Wyodrębniony z otoczenia zbór obiektów materialnych lub abstrakcyjnych, które są połączone związkami tworzącymi strukturę.
3	Hall A.	Zbiór obiektów wraz z relacjami istniejącymi między tymi obiektami i między ich własnościami.
4	Kril G.	Układ pewnych elementów powiązanych ze sobą wzajemnie, tworzących całość.
5	Golka M.	Wyodrębniająca się z otoczenia względnie izolowana całość, złożona z wzajemnie współzależnych, powiązanych, oddziaływujących i uporządkowanych elementów oraz ich własności, pełniących na rzecz tej całości określone funkcje–elementów podlegających dalszej wewnętrznej strukturyzacji.
6	Kamiński J.	Obiekt, zbiór zmiennych lub elementów posiadających strukturę, która oznacza zbiór stałych relacji w sensie używanym w teorii mnogości pomiędzy zmiennymi, stanami elementów, wchodzącymi w skład obiektów.
7	Białyszewski H.	Uporządkowany układ dających się zidentyfikować elementów, gdzie ich miejsce w systemie nie jest przypadkowe.
8	Cempel Cz.	System (kompleks) (*S*) jest n-elementowym zbiorem elementów współdziałających (*R*) ze sobą (*E*), stanowiący celowo zorientowaną jedną całość.
9	Matuszak M.	Uporządkowana para $\langle M, S \rangle$, składającą się ze zbioru *M* i ciągu *S*, określonego jako relacje *R*, gdzie *M* – wyraża zbiór elementów, a *S* – strukturę systemu. Istotną cechą struktury systemu, jest jego złożoność, którą charakteryzują przynajmniej dwie cechy szczegółowe, koncentrujące się na samej złożoności elementów oraz zachodzącymi relacjami pomiędzy nimi. Występujące więzi koncentrują się na liczbie i wielorakości połączeń natomiast cecha takiej struktury wskazuje różnorodność występujących elementów.
10	Żółtowski B.	Wytwór składający się z elementów o określonych właściwościach, które przez wzajemne relacje są odpowiednio zespolone.

Opis matematyczny systemu można przedstawić za pomocą iloczynu kartezjańskiego dwóch lub więcej zbiorów, zawierających następujące elementy (Tarełko, 2011):

- komponenty operacyjne, tj. wejścia, wyjścia, procesy przebiegające w systemie;
- atrybuty systemu, tj. elementy składowe charakteryzujące system;
- relacje powiązujące komponenty operacyjne z atrybutami systemu.

W rozprawie przyjęto, że zbiór obiektów jest systemem, jeśli między uporządkowaną parą obiektów $\langle A, R \rangle$ zajdzie ciąg relacji $<R_1, R_2>$. Natomiast w systemach złożonych, zachodzi wielociąg relacji (Matuszak, 2012). W prostej dwuargumentowej relacji $R \subseteq AxA$ zbiór *A* stanowi zbiór uporządkowanych par, złożonych z elementów zbioru *A*. W złożonych systemach

istotę stanowią zachodzące relacje sprzężeń oraz zachodzące w tych relacjach przekształcenia. Obiekt, który jest rozpatrywany jako system, musi więc posiadać wewnętrzne uporządkowanie zależne od potrzeb swoich podsystemów i jest wyrażony wzorem (Matuszak, 2012; Cempel, 2008):

$$S\langle E, W, R\rangle \tag{2.1}$$

gdzie:

S – badany system;

$E-\{E_i\}, i=1,2,...$ – zbiór wszystkich wyróżnionych systemów, uwzgledniający własności podsystemów;

$W-\{W_i\}, i=1,2,...$ – cechy(mierzalne i niemierzalne) umożliwiające uszczegółowienie i identyfikację obiektu w pożądanym stopniu;

$R-\{R_i\}, i=1,2,...$ – zbiór relacji zachodzących między podsystemami i własnościami podsystemów.

Dekomponując system w pierwszej kolejności ulega on rozkładowi na podsystemy pierwszego, drugiego, …, *n*-tego poziomu aż do uzyskania podsystemów prostych, niepodzielnych i elementarnych (Matuszak, 2012).

$$SS_n=<E_n, W_n, R_n> \tag{2.2}$$

gdzie:

SS_n – dekompozycja systemu;

E_n – podzbiór podsystemu;

W_n – własność jako cecha indentyfikacyjna podsystemu ze względu na relacje i jakość innego systemu;

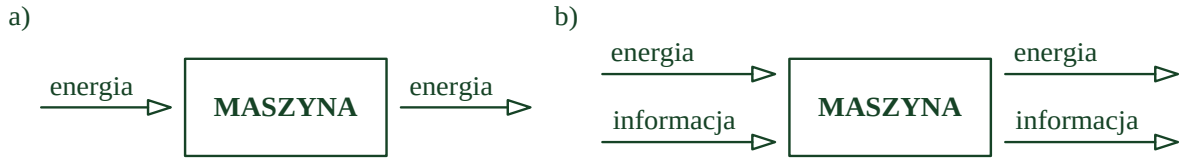
R_n – relacje podsystemu.

Przyjęcie systemowego podejścia do budowy obiektu pozwala na jego dekompozycję do dowolnie wymaganego poziomu. W zależności od możliwości pozyskiwania informacji, dekompozycja może przebiegać poprzez materię obiektu: układy, zespoły, podzespoły, elementy, węzły konstrukcyjne, pary kinematyczne, itd., a także przez funkcje główne, pomocnicze, zabezpieczające, informacyjne, komunikacyjne, nadmiarowe, awaryjne itd. (Młyńczak, 2012).

Maszyna jako system techniczny

Pojęcie „maszyny” w najogólniejszym znaczeniu odnosi się do różnych urządzeń o określonym przeznaczeniu. Klasyczna definicja maszynę określa jako *mechanizm lub zespół me-*

chanizmów we wspólnym kadłubie, służącym do wytwarzania energii lub wykonywania określonej pracy mechanicznej (Lilley, 1958). Artobolewski (1967), maszynę opisał jako sztuczne urządzenie przeznaczone do częściowego lub całkowitego zastępowania funkcji energetycznych, fizjologicznych i intelektualnych człowieka. W duchu powyższej teorii funkcje energetyczne odnoszą się do zastępowania pracy fizycznej, funkcje fizjologiczne dotyczą zastępowania organów, a funkcje intelektualne rozumiane są jako właściwości adaptacyjne w relacji maszyny z otoczeniem. Tradycyjny i współczesny model maszyny pokazano na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Model maszyny: a) klasyczny, b)współczesny
(*Źródło: opracowano na podstawie: Słowiński, 2010*)

Według „Dyrektywy maszynowej" Unii Europejskiej (Tytyk i Butlewski, 2008) za maszynę jako system techniczny można uznać obiekt, który ma zestaw wzajemnie połączonych części i podzespołów, z których przynajmniej jeden jest ruchomy, przy czym odpowiednie człony wykonawcze, układy sterowania, zasilanie itp. są połączone w całość, w celu wykonania konkretnej czynności, szczególnie przetwarzania, obróbki, przemieszczania lub pakowania materiałów.

Każdy system techniczny charakteryzuje się pewnymi cechami ogólnymi (Tarełko, 2011; Niziński, 2000), w tym między innymi:

- jest celowym wytworem człowieka z materii nieożywionej;
- funkcjonuje zgodnie z prawami fizyki;
- ma określone przeznaczenie (zbiór zastosowań);
- ulega uszkodzeniom i najczęściej wymaga obsługi;
- ma określone walory energetyczne, niezawodnościowe, związane z bezpieczeństwem jego działania;
- może szkodzić człowiekowi i środowisku naturalnemu;
- przechodzi w swoim życiu kolejne fazy: określenie potrzeby, projektowanie, konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i likwidację;
- składa się z elementów fizycznych, tworząc strukturę konstrukcyjną;
- posiada oprogramowanie przeznaczone do jej obsługi;
- jest wyposażona w dokumentację technologiczną dopuszczającą do jej eksploatacji;

- na etapie projektowania uwzględnia użytkowników systemu w fazie eksploatacji.

Zazwyczaj pojedyncza maszyna przeznaczona jest do wykonywania ściśle określonej funkcji i można ją określić jako prosty system techniczny. Natomiast system techniczny, realizujący wiele funkcji przy pomocy sprzężonych ze sobą procesów roboczych i pomocniczych, przebiegających w różnych zagregowanych urządzeniach i przy wykorzystaniu wykwalifikowanej kadry, określa się jako złożony (Chybowski, 2014). Systemy te są przeznaczone do realizacji ściśle określonych zadań. Maszyny, które rozważa się jako system techniczny, funkcjonują w sposób celowy i zaplanowany zgodnie z określonymi technologiami. Cechą technicznych systemów działania jest współdziałanie człowieka z określoną liczbą środków technicznych o określonej jakości, którymi człowiek posługuje się w celu realizacji zadań technologicznych lub które uzdatnia do działania, tj. przez regulację, naprawę, serwis (Tytyk i Butlewski, 2008). Złożoność systemu można przedstawić w kilku wymiarach, np.:

- szczegółowości, jako znaczną liczbę elementów;
- przestrzenności, jako przestronność układu;
- dynamiczności, jako dodatnie i ujemne sprzężenia zwrotne.

Do podstawowych atrybutów złożonych systemów technicznych należą (Tarełko,2011):

- istnienie ścisłej agregacji maszyn, mechanizmów i instalacji;
- mnogość realizowanych procesów roboczych i pomocniczych;
- współbieżny przebieg procesu użytkowania, obsługiwania i zasilania.

Istnieje wiele potocznych nazw odnoszących się do pojęcia maszyna jak np.: sprzęt techniczny, aparatura, urządzenie techniczne, wyposażenie techniczne, samochód, itp. W niniejszej pracy autor rozprawy będzie używał pojęcia „złożony system techniczny” odnoszący się do maszyny, centrum obróbczego, zespołu maszyn i urządzeń oraz linii produkcyjnej, wyrażając przez to maszynę lub grupę współdziałających maszyn, bez względu na wielkość, złożoność lub rodzaj dostarczonej energii.

2.1.2 Niezawodność systemu technicznego

Problematyka niezawodności jest bardzo obszerną dziedziną nauki i obejmuje zagadnienia związane ze strukturą fizyczną obiektów, ich właściwościami, warunkami otoczenia, obciążenia, rodzajami i przyczynami uszkodzeń, niezawodnością systemów złożonych, metodami poprawy niezawodności, optymalizacją niezawodnościową systemów itp. (Rzeźnik i in., 2015).

Teoria niezawodności zajmuje się metodami syntezy i analizy oraz badaniem systemów technicznych w etapie projektowania, konstruowania i eksploatacji. Loska (2011) wyróżnił trzy rodzaje niezawodności:

- niezawodność techniczną, uwzgledniającą charakterystyki techniczne;
- niezawodność techniczno-ekonomiczną, uwzgledniająca cechy techniczne i ekonomiczne;
- niezawodność w sensie całościowym, uwzgledniającą charakterystyki techniczne, ekonomiczne i socjologiczne systemów.

W literaturze można znaleźć różnorodność definiowania i interpretacji pojęcia niezawodność. W tabeli 2.2 przedstawiono wybrane definicje niezawodności.

W niniejszej rozprawie przyjęto definicję niezawodności Kaźmierczaka (2000): ***"jako prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu w założonym czasie"***.

Przyjęta w rozprawie definicja odnosi się do prawdopodobieństwa, że system techniczny, który rozpoczął pracę w danej chwili, nie przejdzie w stan niezdatności przed upływem założonego czasu na realizację zadania.

Mimo, iż rozwój techniki i technologii dąży do tego, aby osiągnąć możliwie wysoki poziom niezawodności systemu technicznego, niemożliwe jest wytworzenie systemu technicznego, który potrafi osiągnąć pełną niezawodność. Ograniczenia te dotyczą:

- przypadkowego wpływu otoczenia na obiekt techniczny oraz skali oddziaływania na niego;
- zakresu wiedzy dotyczącej realizacji procesów na obiekcie technicznym;
- powstawania wad materiałowych w tracie eksploatacji obiektu technicznego.

Systemy (obiekty) techniczne dzielą na nienaprawialne, czyli nieodnawialne, których badania niezawodności prowadzi się do pierwszego uszkodzenia oraz odnawialne (naprawialne), gdzie badanie niezawodności prowadzi się do końca ich użytkowania. Liczba możliwych stanów w których może się znaleźć rzeczywisty system wynosi *continuum* jednak ze względów praktycznych ograniczona jest ona do skończonej liczby klas stanów, które z uwagi na przyjęte założenia są istotne w danym podejściu analitycznym (Chybowski, 2014).

Tabela 2.2. Wybrane definicje niezawodności. *(Źródło: Opracowanie własne na podstawie Bobrowski, 1985; Tarełko, 2011; Niziński 2002; Macha, 2001; Ważyńska–Fiok i Jaźwiński, 1990; Żółtowski, 2004; Legutko, 2004; Szopa, 2016, Żółtowski, 1996;Rzeźnik i in., 2015)*

Lp.	Autor	Definicja
1	Bobrowski D.	Prawdopodobieństwo zrealizowania zadania przez system w określonym przedziale czasu $t \in (t_0, t_k)$ i przy ustalonych poziomach oddziaływania czynników wymuszających, rozumianych jako t_o czyli rozpoczęcie procesu oraz t_k , jako czas do chwili wystąpienia awarii.
2	Tarełko W.	Zdolność obiektu technicznego do zachowania zdatności, którą można opisać za pomocą wielu właściwości cząstkowych, tj.: nieuszkadzalności, obsługiwalności, gotowości, trwałości oraz niezawodności bezpieczeństwa.
3	Niziński S.	Kompleksowa właściwość, obejmująca, w zależności od przeznaczenia obiektu i warunków jego eksploatacji, takie właściwości jak: trwałość, nieuszkadzalność, naprawialność, przechowywalność.
4	Macha E.	Jest zdolnością/ prawdopodobieństwem obiektu do spełniania stawianych mu wymagań.
5	Ważyńska–Fiok K. i Jaźwiński J.	Zdolność obiektu do wykonywania określonych funkcji w określonych warunkach i w określonym czasie.
6	Żółtowski J.	Jest to prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu w określonych warunkach eksploatacyjnych, w wymaganym przedziale czasu.
7	Legutko S.	Prawdopodobieństwo bezusterkowej pracy w przyjętych warunkach eksplantacji (użytkowania i obsługiwania) w danym okresie użytkowania.
8	Szopa T.	Jest to zdolność obiektu do prawidłowego funkcjonowania, w określonym czasie bez niesprawności.
9	Żółtowski B.	Zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkadzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi.
10	Rzeźnik i in.	Zdolność urządzenia technicznego do prawidłowego funkcjonowania w określonych warunkach eksploatacji przez zadany czas.

W najprostszym modelu niezawodności uszkodzenia są oceniane dwuwartościowo. W zależności od tego czy niesprawność (awaria) wystąpi, obiekt będzie znajdował w stanie niezdatności lub kiedy nie dojdzie do uszkodzenia w chwili *t* to obiekt będzie znajdował się w stanie zdatności. Stan zdatności i niezdatności obiektu w określonej chwili t należy do rozłącznych zdarzeń losowych, które można wyrazić poprzez zmienną losową *X(t)* opisaną wzorem:

$$X(t) = \{_0^1 \tag{2.4}$$

gdy:

1 – w chwili *t* obiekt jest niezdatny;

0 – w chwili *t* obiekt jest zdatny.

W modelu dwustanowym systemu S_0 opisuje stan zdatności, a S_1 – stan niezdatności systemu. Uszkodzenie systemu jest przejściem S_0 do S_1, natomiast odnowa systemu następuje, kiedy S_1 przejdzie do stanu S_0. Zmienna losowa *X(t)* , opisuje długość przedziału czasu dla systemów technicznych nieodnawialnych, wyrażających trwałość tego systemu (Grabski i Jaźwiński, 2009).

Elementy składowe systemu, które ze względu na możliwość przywrócenia właściwości eksploatacyjnych podlegają następującej klasyfikacji (Chybowski, 2014):

- elementy nieodnawialne (nienaprawialne), których czas poprawnej pracy równy jest przedziałowi czasu pomiędzy rozpoczęciem użytkowania (*t=0*) a pierwszym uszkodzeniem;
- elementy odnawialne (naprawialne), czyli te które eksploatuje się do chwili uszkodzenia, po czym podlegają one naprawie lub wymianie na części zdatne. Nie ma znaczenia, czy uszkodzona część została naprawiona, czy wymieniona na nową, przywracając systemowi stan pełnej zdatności.

Elementy naprawialne dzielą się na:

- odnawialne o pomijanym czasie odnowy, których czas odnowy jest pomijalnie mały w porównaniu z czasem jego użytkowania. Przyjmuje się, że czas odnowy jest równy zeru;
- odnawialne o skończonym czasie odnowy, dla których czas naprawy jest istotny w stosunku do czasu pracy. Elementy te są bardzo ważne pod kątem konsekwencji uszkodzeń i generują koszty związane czasochłonnością naprawy i wymianą niezdatnej części na nową.

Charakterystyki niezawodności można opisać za pomocą następujących funkcji:

1. Funkcja niezawodności

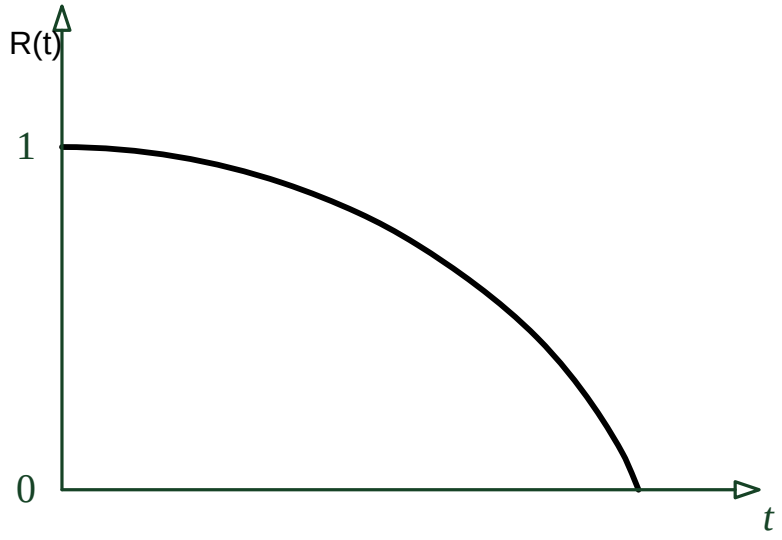
Miarą, która charakteryzuje zdolność obiektu do realizacji nakładanych zadań w określonych warunkach i określonym przedziale czasu jest nieujemna, ciągła zmienna losowa *T,* wyrażająca czas zdatności lub trwałości obiektu bez wystąpienia niesprawności. Funkcja niezawodności jest prawdopodobieństwem spełnienia takiego wymagania i wyrażoną za pomocą wzoru:

$$R(t) = P(T \geq t)\ ,\ t \geq 0 \tag{2.5}$$

gdzie:

R(t) – niezawodność obiektu technicznego rozumiana jako funkcja niezawodności;
P – prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu technicznego;
T – czas funkcjonowania obiektu do pierwszej niesprawności lub miedzy niesprawnościami;
t – określony czas funkcjonowania obiektu.

Funkcja niezawodności dla każdego ustalonego $t \geq 0$ ma wartość równą prawdopodobieństwu pozostawania w stanie zdatności systemu technicznego do chwili *t*. Jeśli w chwili początkowej pracy obiektu nastąpi jego uszkodzenie to funkcja *R*(*0*) =*P*(*T=0*), nazywana jest niezawodnością początkową systemu technicznego (Macha, 2001). Przykładową funkcję niezawodności przedstawiono na wykresie (rys. 2.4):



Rysunek 2.4. Przykładowa funkcja niezawodności.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Macha, 2001*)

2. Funkcja zawodności

W teorii niezawodności przyjęto, że maszyny ulegają uszkodzeniom pod wpływem czynników zewnętrznych i wewnętrznych, tracąc zdolność do realizacji założonych zadań. Funkcja, która dla każdej ustalonej $t \geq 0$ przyjmuje wartość prawdopodobieństwa, że maszyna w chwili *t* ulegnie uszkodzeniu, opisuje rozkład prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia i jest definiowana jako *funkcja zawodności* (Macha, 2001; Chybowski, 2014):

$$F(t) = P(T \geq t) = 1 - R(t) \tag{2.6}$$

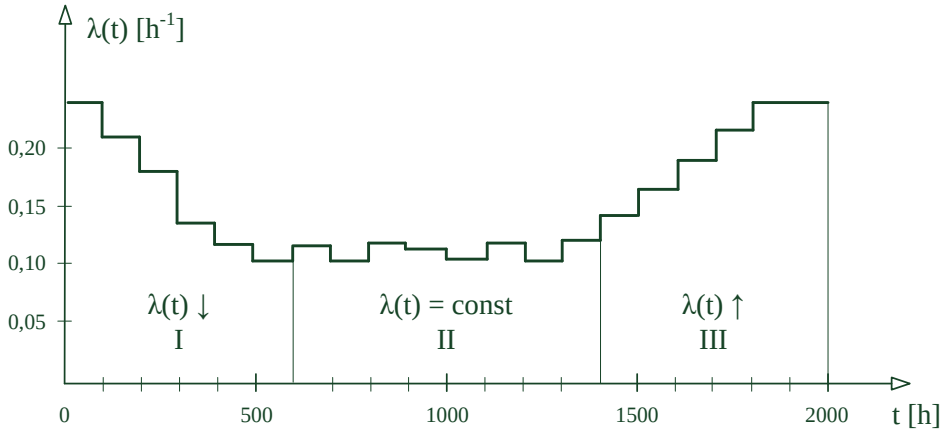
gdzie:

F(t) – funkcja zawodności;
P – prawdopodobieństwo zdarzenia;
$T \leq t$ – czas pracy *T* obiektu od chwili *t*;
t – prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu do chwili *t*.

3. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa

Funkcja opisuje zdolność do spełniania wymagań opisujących przebywanie systemu w jednym z dwóch stanów jako prawdopodobieństwo, że obiekt który spełnia wymagania w danej chwili czasu *t*, to w następnym przedziale czasu dt lub Δt przestanie je spełniać.

Badanie czasu zdatności i niezdatności systemów technicznych określa się za pomocą *funkcji ryzyka*, która opisuje prawdopodobieństwo, jaka część obiektów, które znajdują się w stanie zdatności, może ulec uszkodzeniu w przedziale czasu $(t, t+dt)$ (Macha, 2001). Obiekty w stanie niezdatności, opisuje się przy pomocy współczynnika $\lambda(t)$, wyrażającym funkcję ryzyka, funkcje intensywności ubywania lub intensywności uszkodzeń. Wartość funkcji opisuje odpowiednio: ryzyko, intensywność ubywania oraz intensywność uszkodzeń. Współczynnik intensywności uszkodzeń jest w przybliżeniu równy odwrotności średniej trwałości obiektu. Wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\lambda(t)$ niezawodność obiektów technicznych maleje, natomiast kiedy $\lambda(t)$maleje, właściwości obiektu polepszają się. Przebieg typowej funkcji niezawodności dla rozkładu wykładniczego, tzw. krzywą wannową, pokazano na rysunku 2.5.



Rysunek 2.5. Przykładowa funkcja ryzyka. (*Źródło: opracowano na podstawie: Macha, 2001*)

Graficzna interpretacja funkcji ryzyka przedstawia podział na trzy okresy w trakcie eksploatacji systemu technicznego. Pierwszy dotyczy okresu dojrzewania, w którym uwidoczniają się ukryte wady: materiałów, konstrukcji, montażu, niedokładności technologicznej lub kontroli. W drugim okresie zakłada się stałą intensywność uszkodzeń, która jest głównie spowodowana przez czynniki losowe nie dające się z góry zidentyfikować (awaria). W ostatnim trzecim okresie ujawniają się niezdatności powstające w skutek kumulacji czynników powodujących starzenie się maszyn i ich elementów. Wśród nich wymienia się zmiany fizyczne i chemiczne, postępujące starzenie się używanych materiałów, deformację konstrukcji, zmiany wartości parametrów obiektu poza dopuszczalne progi graniczne.

Jeżeli funkcja niezawodności jest absolutnie ciągła, to można ją przedstawić w postaci (Grabski i Jaźwiński, 2009; Bobrowski, 1985):

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(u)du\,, \quad t \geq 0 \tag{2.7}$$

gdzie:

R(t) – niezawodność obiektu technicznego;

$f(u)du$ – funkcja gęstości rozkładu czasu zdatności.

Funkcja *f* spełniająca powyższy warunek nazywa się *funkcją gęstości prawdopodobieństwa* i może być przedstawiona w postaci pochodnej (Macha, 2001):

$$f(t) = \frac{d}{dt}\left[F(t)\right] = -\frac{d}{dt}[R(t)] \tag{2.8}$$

4. Intensywność uszkodzeń

Funkcja intensywności umożliwia rozważenie intensywności uszkodzeń dla szerszej klasy zmiennych losowych i niekoniecznie absolutnie ciągłych. Definiowana jest następująco (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt}[\ln R(t)] = \frac{f(t)}{R(t)}\,, \; t \in R \tag{2.9}$$

Funkcja $\lambda(t)$ pokazuje względny spadek niezawodności części obiektów w stosunku do obiektów zdatnych. Funkcję charakteryzuje to, że w każdej chwili *t* względne pogorszenie się niezawodności obiektu przypada na jednostkę czasu (Bobrowski, 1985).

5. Skumulowana intensywność uszkodzeń – funkcja wiodąca

Skumulowaną intensywność uszkodzeń ma na celu informację o wyczerpywaniu się zapasu niezawodności a tym samym możliwości systemu do wykonania przez obiekt zadania. Funkcję można przedstawić w postaci (Grabski, 2002):

$$\Lambda(t) = -\ln[R(t)] = \int_{-\infty}^{t} \lambda(u)du\,, \; t \in R \tag{2.10}$$

Funkcję interpretuje się jako miarę wyczerpania się „zasobu niezawodności" obiektu. Ze wzoru 2.10. wynika związek(Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$R(t) = \exp[-\Lambda(t)], \; t \in R \tag{2.11}$$

Ze wzoru 2.11. wynika, że funkcja niezawodności powstanie wtedy, jeśli funkcja wiodąca przyjmie wartości nieujemne, niemalejące i prawostronnie ciągłe.

6. Wariancja czasu zdatności i odchylenie standardowe

Wśród własności funkcyjnych stosowane są charakterystyki liczbowe opisujące parametry niezawodności. Jednym z kluczowych parametrów jest wartość oczekiwana zmiennej losowej *T*, opisującą średni czas zdatności obiektu. Przyjmuje się, że rozkład czasu zdatności będzie odnosił się do zbioru liczb rzeczywistych i nieujemnych (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t)dt \tag{2.12}$$

Znajomość momentu zwyczajnego typu *n*–tego stopnia umożliwia obliczenie wariancji czasu zdatności oraz jego odchylenie standardowe (Grabski,2002):

$$V(T) = E(T^n) - (E(T))^n \tag{2.13}$$

$$\sigma(T) = \sqrt{V(T)} \tag{2.14}$$

gdzie:

$\sigma(T)$ - odchylenie standardowe czasu zdatności systemu dwustanowego;

E(T) - średni czas zdatności systemu dwustanowego;

V(t) - wariancja czasu zdatności.

Rozkład czasu zdatności systemu technicznego

Rozkład wykładniczy

Rozkład wykładniczy czasu zdatności należy do najprostszych w teorii niezawodności, ponieważ zależy od jednego parametru, którym jest stała intensywność uszkodzeń. Zmienna losowa *T*, odnosząca się czasu zdatności systemu ma rozkład wykładniczy z parametrem $\lambda > 0$ jeśli gęstość rozkładu tej zmiennej losowej ma postać (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} I_{[0,\infty]}(t) \tag{2.15}$$

Pozostałe charakterystyki funkcyjne mają następującą postać (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$R(t) = e^{-\lambda t}$ funkcja niezawodności (2.16)

$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ funkcja zawodności (2.17)

$\lambda(t) = \lambda$ intensywność uszkodzeń (2.18)

$\Lambda(t) = \lambda t$ funkcja wiodąca (2.19)

Wśród charakterystyk liczbowych:

$ET = \lambda^{-1}$ wartość oczekiwana (2.20)

$VT = \lambda^{-2}$ wariancja (2.21)

Rozkład wykładniczy uszkodzeń jest jedynym rozkładem, który można opisać w oparciu o następujące własności:

- ma stałą intensywność uszkodzeń;

- jest jedynym rozkładem ciągłym charakteryzującym się „brakiem pamięci" co oznacza, że jeśli do chwili *t* system był w stanie zdatności, to licząc od tej chwili, czas zdatności tego elementu ma taki sam rozkład jak elementu nowego.

Wykładniczą funkcje niezawodności opisuje wzór (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$R(t) = P(T > t) = e^{-\lambda t}, t > 0 \tag{2.22}$$

Wykorzystanie rozkładu wykładniczego odnosi się do następujących zdarzeń w procesie eksploatacji (Grabski i Jaźwiński, 2009; Macha, 2001):

- obciążenie obiektu ma charakter losowy co oznacza, że jeżeli obciążenie przekroczy określoną dopuszczalną wartość to wystąpi stan niezdatności;
- uszkodzenie elementu systemu technicznego jest uwarunkowane oddziaływaniem zdarzeń przypadkowych wywołanych czynnikami zewnętrznymi a nie spowodowanych w wyniku stanu technicznego (mikrouszkodzenia);
- prawdopodobieństwo zdatności obiektu jest niezależne od okresu jego użytkowania i ma czysto przypadkowy charakter;
- rozkład wykładniczy nie uwzględnia fazy adaptacji i starzenia się systemu technicznego w cyklu życia systemu.

Do zalet stosowania rozkładu wykładniczego można przypisać (Bobrowski, 1985):

- prostotę obliczeń przy wystarczającej dokładności pierwszego przybliżenia $ET = \lambda^{-1}$;
- występowanie licznej grupy systemów technicznych, które charakteryzuje czas zdatności mający rozkład wykładniczy lub nieistotnie różniący się od wykładniczego;
- wykorzystanie informacji o rozkładzie czasu zdatności w opisaniu stanu systemu w oparciu o procesy losowe Markowa, które wymagają z założenia zastosowanie tego rozkładu.

Niezawodność elementów w systemie technicznym

Niezawodność systemów technicznych nie jest tylko cechą wytrzymałościową elementów, ale także zależy od jego struktury niezawodnościowej (Macha, 2001). Identyfikacja struktury niezawodnościowej systemu wymaga określenia funkcji, jaką ma do spełnienia ten system, oraz kryteriów oceny, kiedy dany system jest niesprawny (Słowiński, 2014). W zależności od wyboru kryterium zdolności systemu, może on przyjmować różne postacie struktur niezawodnościowych. Wśród podstawowych wyróżniono:

- strukturę szeregową;
- strukturę równoległą;
- strukturę mieszaną (szeregowo – równoległa, równoległo –szeregową);

- inne.

Ze względu na opis i analizę (Grabski i Jaźwiński, 2009) struktur systemu, zbiór elementów istotnych zostanie oznaczony symbolem *E* i będzie się składał się z elementów e_i w których $i=(i_1,i_2,...,i_r)$ jest liczbą należącą do skończonego zbioru $N_1 \; x \; N_2 \; x \; ...x \; N_r$, gdzie $N_j=\{1,2,...,n_j\}$ dla j=1, 2,…, r. Przyjmuje się, że każdy z elementów znajduje się w określonym stanie niezawodności. Stan niezawodnościowy elementu o numerze $i \in N$ reprezentuje zbiór S_i, przy czym $S_i=\{0,1,2,...,m_i\}$, gdzie $m_i \in N$.

Przyjęto, że stany niezawodnościowe e_i opisują różne poziomy zdatności w których m_i oznacza całkowitą zdatność a *0* całkowitą niezdatność. Własnością opisującą strukturę systemu jest funkcja φ która, przyporządkowuje stanom niezawodnościowym elementów systemu jego stany, natomiast ciąg symboli: $(E,S_1,S_2,...,S_n,S,\varphi)$ oznacza system niezawodnościowy obiektu technicznego.

Poniżej przedstawiono przykłady struktur binarnych systemu, które mogą stanowić odpowiednie narzędzie do konstruowania modeli niezawodnościowych realnych systemów. Z uwagi na przedmiot rozprawy, autor podał cztery podstawowe struktury, natomiast odwzorowując badany system techniczny (rozdział 3), binarna struktura szeregowa wydała się właściwa do skonstruowania modelu przedstawionego w rozdziale czwartym.

System o strukturze szeregowej

System, którego struktura jest określona jako funkcja struktury systemu φ oraz kiedy jego elementy składowe są uszkodzeniami wzajemnie niezależnymi $x_1,...,x_n$ jest opisany za pomocą wzoru (Grabski i Jaźwiński):

$$\varphi(x)=\min(x_1,...,x_n)=\prod_{i=1}^{n} x_i \tag{2.23}$$

nazywany jest systemem szeregowym lub systemem o strukturze szeregowej.

Struktura ta, uznawana jest za najprostszą i najbardziej zawodną, ponieważ zawodność systemu uwarunkowana jest niesprawnością dowolnego elementu w systemie technicznym. Strukturę szeregową przedstawiono na rysunku 2.6.

System techniczny posiadający strukturę szeregową (rys. 2.6.) opisuje system, który jest w stanie zdatności kiedy jego wszystkie elementy są w stanie zdatności.



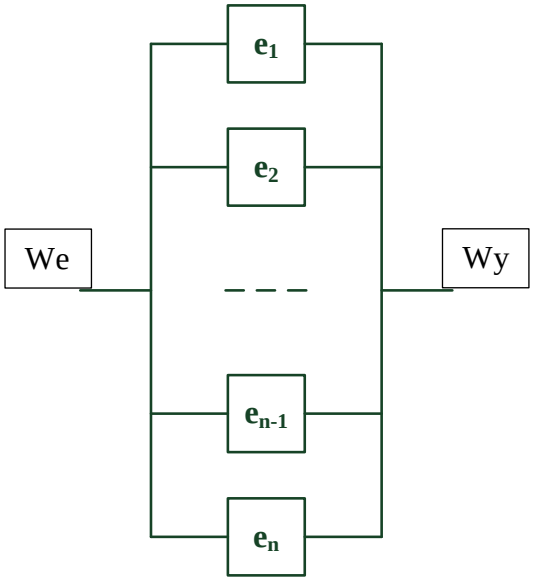
Rysunek 2.6. Schemat systemu o strukturze szeregowej.
(*Źródło: opracowano na podstawie Grabski i Jaźwiński, 2009*)

System o strukturze równoległej

Postać systemu o strukturze równoległej opisuje system, który jest zdatny jeśli przynajmniej jeden element systemu jest zdatny. Funkcja wygląda następująco (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\varphi(x) = \max(x_1, ..., x_n) = \coprod_{i=1}^{n} x_i \tag{2.24}$$

Schemat struktury równoległej pokazano na rysunku 2.7.



Rysunek 2.7. Schemat systemu o strukturze równoległej.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*)

Strukturę równoległą wprowadza się w celu osiągania długiego czasu niezawodnej pracy systemu technicznego. Wprowadzanie modułów rezerwowych pozwala w przypadku wystąpienia

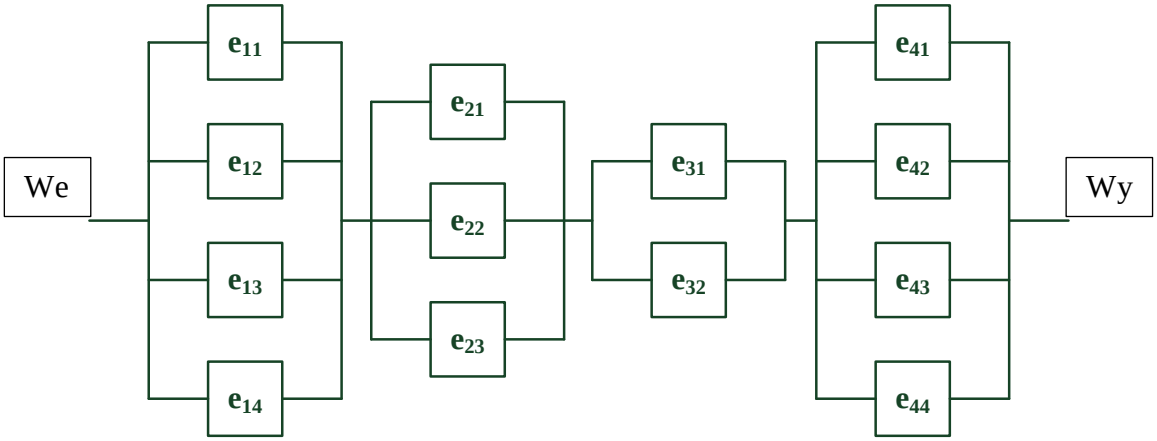
awarii przejąć ich funkcje. W takiej strukturze trwałość jest jednoznaczna z trwałością najmocniejszego elementu a uszkodzenia są od siebie niezależne i stanowią rezerwę dla pozostałych.(Macha, 2001; Maksymiuk, 2003).

System o strukturze równoległo–szeregowej

System pozostanie w stanie zdatności w strukturze równoległo–szeregowej (rys. 2.8), gdy przynajmniej jeden spośród jego elementów funkcjonuje poprawnie. Trwałość struktury zależna jest od najsłabszego modułu w najtwardszym zespole i jest wyrażona funkcją (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\varphi(x) = \min_{1 \le i \le m1} \max_{\le j \le l_i} \{x_{ij}\} \tag{2.25}$$

gdzie $E = \{e_{ij} : i = 1,...,m,\ j = 1,...,l_i\}$ oznacza zbiór elementów systemu a wektor stanów elementu systemu opisze zależność $x = (x_{ij} : B = 1,...,m,\ j = 1,...,l_i)$. Na rysunku 2.8 przedstawiono przykład systemu o strukturze równoległo–szeregowej w którym l_1=4, l_2=3, l_3=2, l_4=4, m=4 (Grabski i Jaźwiński, 2009)



Rysunek 2.8. Schemat systemu o strukturze równoległo–szeregowej.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*)

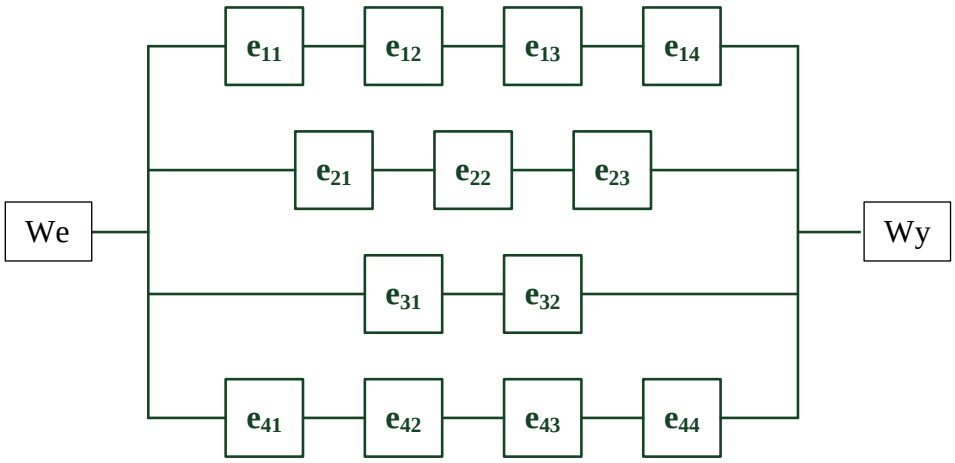
System o strukturze szeregowo–równoległej

System pozostanie w stanie zdatności w strukturze szeregowo–równoległej, gdy wszystkie jego *e* zespoły w równoległym połączeniu, każdy składający się z *m* (gałęziach połączonych równolegle) elementów funkcjonują poprawnie (Słowiński, 2014). Trwałość systemu o strukturze szeregowo–równoległej zależy od najsłabszego modułu i w pierwszej kolejności należy

określić trwałość najsłabszego zespołu (minimum) a następnie obliczana jest trwałość najmocniejszego elementu i –tego zespołu (maksimum) (Macha, 2001).Funkcje opisuje wzór (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\varphi(x) = \max_{1 \le i \le m1} \min_{\le j \le l_i} \{x_{ij}\} \tag{2.26}$$

Na rysunku 2.9 przedstawiono przykład systemu o strukturze szeregowo–równoległej w którym l_1=4, l_2=3, l_3=2, l_4=4, m=4 (Grabski i Jaźwiński, 2009)



Rysunek 2.9. Schemat systemu o strukturze szeregowo–równoległej.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*)

Struktury niezawodnościowe złożonych systemów technicznych można modelować kilkoma metodami, głównie opartymi na dwuwartościowej algebrze Boole'a (Młyńczak, 2012). Do najczęściej stosowanych metod zaliczyć można: metody analityczne, metody stanów operacyjnych, bloki niezawodności (RBD), metody drzewa błędów i metody numeryczne wykorzystujące symulację procesów opartą na generatorach liczb losowych (metoda Monte Carlo).

2.1.3 Cykl życia systemu technicznego

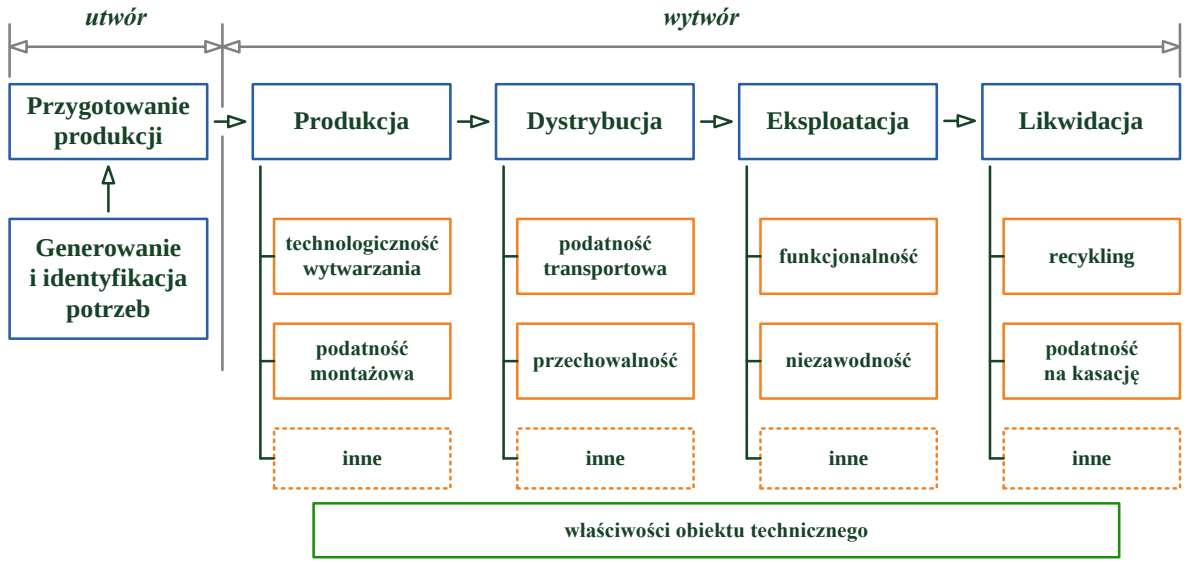
Wiedza dotycząca cyklu życia systemu technicznego, pozwala na efektywniejsze zarządzanie nim w szczególności, kiedy jest to system złożony.

Niziński (2000) wyróżnił cztery fazy istnienia obiektu technicznego: potrzebę, projektowanie i konstruowanie, wytwarzanie oraz eksploatację. Według tego autora faza „potrzeby" systemu technicznego nie istnieje materialnie, lecz istnieje w swetrze abstrakcji, której przypisuje się określone (w sposób życzeniowy) zdolności i funkcje. Również w fazie projektowania i konstruowania nie występuje rzeczywisty system lecz widoczny jest w postaci rysunków, modeli lub prototypów.

Cykl życia obiektu technicznego wg. Żółtowskiego (1996) został opisany jako zbiór specyficznych faz, pozwalających wyodrębnić kluczowe obszary i zadania w nich realizowane. Szczególnie podkreśla eksploatacje systemów technicznych jako główny obszar istnienia maszyny w ramach procesu zaspokojenia potrzeb. Fazy istnienia opisuje jako:

- wartościowanie, jako rozpoznanie potrzeby istnienia określonego środka technicznego, w wyniku którego zostaje rozpoznana potrzeba w postaci odpowiedniej specyfikacji wymagań i zaleceń;
- konstruowanie na które składa się dobór cech konstrukcyjnych (geometrycznych, materiałowych i dynamicznych), czego wynikiem jest konstrukcja (prototyp) i jej opis w postaci dokumentacji konstrukcyjnej;
- wytwarzanie, polegające na wytworzeniu środka technicznego w oparciu o opracowana we wcześniejszym etapie dokumentację;
- eksploatacja, będąca docelowym istnieniem środka technicznego, w wyniku czego obiekt jest wykorzystywany do realizacji celu zgodnie z jego przeznaczeniem.

Cykl życia obiektu technicznego pokazano na rysunku 2.10.



Rysunek 2.10. Cykl życie obiektu technicznego.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Tarełko, 2011*)

Z rysunku 2.10. wynika, że generowanie i identyfikacje potrzeb odnosi się do wpływu postępu technicznego, dążenia do przewagi konkurencyjnej oraz wynikających problemów w trakcie fazy eksploatacji obiektu. Na etapie przygotowania produkcji należy przeprowadzić analizę wymagań przyszłego użytkownika, określić zgodność z obowiązującymi normami

prawnymi, oszacować wstępne koszty oraz możliwość zbytu. Należy także doprecyzować koncepcje obiektu oraz konstrukcje jego części składowych w celu opracowania prototypu. Na etapie produkcji wytwarza się poszczególne części oraz przeprowadza się ich montaż. Na etapie dystrybucji transportuje się obiekt do jego miejsca przeznaczenia w celu jego instalacji. w trakcie eksploatacji obiekt techniczny jest użytkowany i obsługiwany, przy zachowaniu wszelkich norm i zasad bezpieczeństwa. Etap likwidacji odnosi się kasacji obiektu lub jego recyklingu.

Z uwagi na przedmiot niniejszej rozprawy, szczególną uwagę cyklu życia systemu technicznego poświęcono na opis i charakterystykę fazy eksploatacji. Dążenie do wydłużenia okresu eksploatacyjnego parków maszynowych jest priorytetem w podejmowaniu działań obsługowych w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

2.2 Eksploatacja systemów technicznych

2.2.1 Pojęcie i cele eksploatacji systemów technicznych

Dyscyplina wiedzy dotycząca eksploatacji złożonych systemów technicznych, budowana jest w oparciu o wiele nauk (Kazimierczak, 2000). Ogólnie ujmując nauka o eksploatacji ma za cel optymalne wykorzystanie urządzeń przez człowieka. Nauka zajmuje się syntezą, analizą i badaniem systemów eksploatacji, a w szczególności zagadnieniami procesów użytkowania i obsługiwania technicznego maszyn i urządzeń występujących w tych systemach (Żółtowski, 2000). Teoria opiera się na uogólnieniach, tzw. eksploatacjach szczegółowych (eksploatacja pojazdów mechanicznych, maszyn roboczych, itp.), teorii działania (prakseologii), teorii układów względnie odosobnionych (cybernetyki), a także nauk konstrukcyjnych i technologicznych a w szczególności teorii urządzenia (Niziński, 2002).

W kontekście dużej różnorodności możliwych kierunków badawczych (wynikających m. in. z różnych interpretacji terminu eksploatacja) w powiązaniu z wieloaspektowością podejmowanej obecnie problematyki eksploatacyjnej zagadnienie eksploatacji sprowadza do trzech podstawowych kategorii (Loska, 2010):

- eksploatacja jako synonim użytkowania, czyli używania wytworów techniki do zaplanowanych działań, a w aspekcie systemów produkcyjnych - jako zbiór działań pomocniczych (najczęściej serwisowych);
- eksploatacja jako zbiór procesów technicznych, opisujących zorientowane czasowo zdarzenia, stanowiące podstawę podejmowania określonych na nie reakcji, skutkujące przeplatającymi i wzajemnie uzupełniającymi się działaniami użytkowymi i obsługowo-naprawczymi;

- eksploatacja jako złożony zespół przedsięwzięć technicznych i nietechnicznych związanych z kompleksowym zapewnieniem właściwego funkcjonowania maszyn/ systemów technicznych[4] zarówno w chwili obecnej, jak i w przyszłości.

W tabeli 2.3 przedstawiono wybrane definicje pojęcia eksploatacji, opracowane przez autorytety tej dziedziny nauki.

Tabela 2.3. Wybrane definicje eksploatacji.
(*Źródło: Opracowanie na podstawie: Młyńczak, 2012*)

Lp.	Autor	Podstawowe cechy definicji	Uwagi
1	Hebda M. Konieczny J. Mazur T.	Urządzenie jest eksploatowane, gdy jest użytkowane i obsługiwane.	Podstawą definicji jest przyjęcie za podstawę analizy łańcucha działania opartego o uporządkowaną trójkę elementów: • podmiot, • pośrednik, • przedmiot.
2	Ziemba S.	System eksploatacji to 5 podsystemów: • działanie otoczenia na system eksploatacji, • działanie systemu eksploatacji na otoczenie, • zakłócenia na otoczenie, • podsystem informacyjny, • podsystem produkcyjny, • podsystem zasilający, • podsystem utrzymania.	Zadaniem podsystemu utrzymania w przedsiębiorstwie jest zabezpieczenie ciągłości pracy maszyn przez: • obsługiwanie, • naprawy bieżące, • naprawy średnie, • naprawy główne.
3	Diwiliński L.	Eksploatacja obiektu technicznego jest działaniem, którego celem jest uzyskanie zamierzonego zasobu funkcjonowania obiektu. Użytkowania nie zalicza się do eksploatacji, uznając, że jest ich wzajemne uwarunkowanie, przy czym eksploatacja pełni rolę służebną.	Zasadniczym elementem procesującym jest człowiek zmieniający stan obiektu jako operator, naprawiający lub zabezpieczający obiekt przed wpływami otoczenia.
4	Powierza R.	Eksploatacja to sekwencja zdarzeń losowych wyrażających stany obiektu i ich zmiany, czyli kontrolowany proces losowy wyczerpywania zasobu użytkowego obiektu.	Autor uważa, że: • użytkowanie jest działaniem należącym do procesu technologicznego, • użytkowanie wpływa na przebieg eksploatacji, • okres użytkowania należy do okresu eksploatacji.
5	Woropay M.	Eksploatacja to działanie systemu typu człowiek–maszyna. Istotną rolę spełnia otoczenie systemu,	Autor na przykładzie hierarchicznej struktury przedsiębiorstwa transportu miejskiego wyróżnia podsystemy:

[4] Pojęcie *maszyna* jest interpretowane jako sztuczne urządzenie przeznaczone do częściowego lub całkowitego zastąpienia funkcji energetycznych, fizjologicznych lub intelektualnych człowieka (Karpiński, 2013). Natomiast *system techniczny* opisany jest jako obiekt, który ma określone przeznaczenie, lub zbiór zastosowań (Kotarbiński, 2003)

		które wpływa na zachowanie systemu i jego podsystemów.	• zarządzania eksploatacją (kierownik i jego zastępcy), • informacyjny (wydział techniczno-informacyjny), • użytkowanie autobusów (wydział dyspozycji ruchu), • diagnostyczny (stacja diagnostyczna), • zasilający (magazyn, stacja paliw), • obsługiwania autobusów (stacja obsługi i wydział produkcji i regeneracji), • procesowy (kierowcy i autobusy).
6	Downarowicz O.	Eksploatacja obiektu technicznego jest to działanie złożone obejmujące: • użytkowanie, • obsługiwanie, • łącznie organizowanie w systemie eksploatacji.	Autor podkreśla, że znamienną własnością systemu eksploatacji obiektów technicznych jest to, że jedna z części tego systemu jest jednocześnie jedną z części systemu operacji.
7	Żółtowski B.	Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn (ASEM) to rozszerzona koncepcja „pętli jakości”. W jej skład wchodzi: • wartościowanie, • konstruowanie, • wytwarzanie, • eksploatacja.	Producent zainteresowany jakością jest odpowiedzialny za wyrób od zamysłu do likwidacji obiektu. Producent rozpoznaje potrzeby, konstruuje i wytwarza swoje wyroby w oparciu o najnowsze osiągnięcia myśli technicznej, zabezpiecza swój wytwór własnym serwisem obsługowym w czasie eksploatacji, a także wyposaża obiekty w środki diagnostyczne.
8	Niziński S.	Eksploatacja, to ogół wszystkich zdarzeń, zjawisk, i procesów zachodzących w danym obiekcie od chwili zakończenia procesu jego wytwarzania do chwili likwidacji.	Autor system eksploatacji obiektów technicznych rozpatruje w aspekcie sterowania, czyli celowego oddziaływania na wejścia system, tak aby na jego wyjściu uzyskać zrealizowanie ustalonych wcześniej zadań.
9	Oziemski S.	Eksploatacja to działanie człowieka z maszyną	System eksploatacji stanowi synergiczną całość, składającą się z wiedzy, umiejętności, a także zaangażowania ludzi, która decyduje o wynikach przedsiębiorstwa.
10	Legutko S.	Eksploatacja to ogół zdarzeń, zjawisk, działań i procesów, jakim podlega i w jakich uczestniczy dany obiekt techniczny od chwili zakończenia procesu jego wytwarzania aż do likwidacji.	Eksploatacja urządzeń technicznych jest działalnością, której celem jest zaspokajanie potrzeb związanych pośrednio lub bezpośrednio z potrzebami życiowymi człowieka. W procesie eksploatacji występują cztery rodzaje działań: • użytkowanie, • obsługiwanie, • zasilanie, • zarządzanie.

11	Muhlemann A.P. Oakland S.J. Lockyer K.G.	Cele obsługi ekspolatacyjnej: • umożliwienie osiągnięcia pożądanej jakości wyrobów lub usług oraz zadowolenia klientów dzięki prawidłowo wyregulowanym, konserwowanym i obsługiwanym urządzeniom produkcyjnym, • zmaksymalizowanie ekonomicznego okresu użytkowania wyposażenia produkcyjnego, • utrzymanie warunków bezpiecznej eksploatacji sprzętu i zapobiegania rozwojowi zagrożeń, • minimalizacja kosztów produkcji lub kosztów własnych bezpośrednio związanych z obsługą i naprawą urządzeń, • minimalizacja częstości i rozległości następstw przerw w procesie produkcji, • maksymalizacja zdolności produkcyjnych obiektów i wyposażenia.	Autorzy uważają, że system obsługi eksploatacyjnej jest częścią systemu operacyjnego przedsiębiorstwa, ze względu na konflikt pomiędzy częstością wykonywania remontów a sumarycznymi kosztami obsługi i awarii. Całość obsługi eksploatacyjnej może być przedmiotem planowania. Występują dwa rodzaje strategii obsługi obsługiwania eksploatacyjnego: • naprawa lub wymiana wskutek uszkodzenia sprzętu, • profilaktyka remontowa: - okresowa, - resursowa, - wg możliwości, - uwarunkowana stanem.

Analizując definicje zawarte w tabeli 2.3 można zauważyć, że (Młyńczak, 2012):

- eksploatacja jest etapem finalnym procesu zaspokajania potrzeb;
- eksploatacja jest etapem docelowym procesu zaspokajania potrzeb;
- etapy poprzedzające eksploatacje pełnią ważną rolę „usługową" na rzecz eksploatacji;
- w wieloetapowym procesie istnienia środka technicznego etap eksploatacji jest weryfikacją końcową wszystkich poprzednich etapów;
- sprzężenie zwrotne pomiędzy eksploatacją a rozpoznaniem potrzeby stanowi źródło doświadczeń prowadzących do modyfikacji poprzednich lub stymulowania potrzeb tworzenia nowych środków technicznych.

Podejmując zakres interpretacji pojęcia eksploatacji w świetle holistycznego podejścia do problemów funkcjonowania i obsługiwania złożonych systemów technicznych, autor przyjmuje w pracy definicję (Karpiński, 2013; Loska, 2010): ***„eksploatacja systemu technicznego stanowi zbiór celowych działań technicznych, organizacyjnych, normatywno-prawnych i ekonomicznych, podejmowanych przez człowieka z wykorzystaniem odpowiednich środków w okresie od rozpoczęcia funkcjonowania systemu do jego kasacji".***

Cele eksploatacji złożonych systemów technicznych, skoncentrowane są na (Loska, 2011):

- stanie technicznym, będącym miarą użytkowania obiektu w określonym czasie;
- niezawodności opisującej gotowość obiektu do działania;

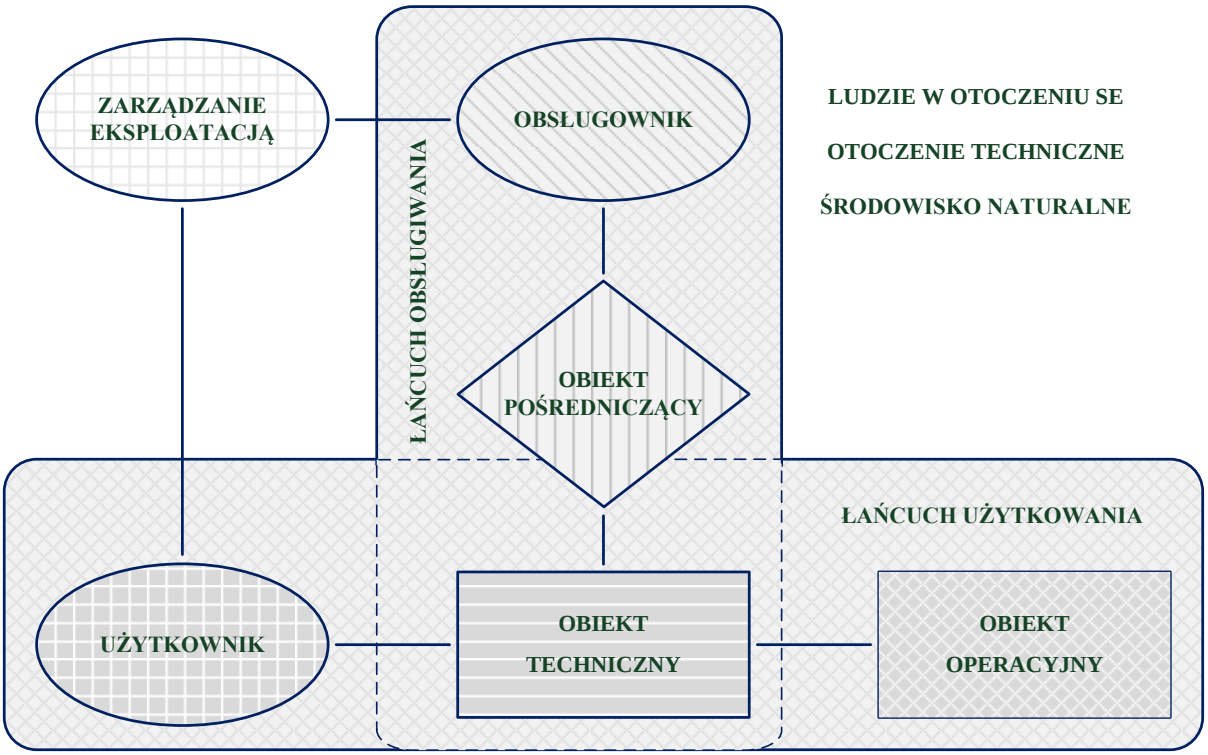
- jakości, wyrażającej zdolność obiektu do zaspokojenia stwierdzonych lub przewidywanych potrzeb.

Podejmowane działania eksploatacyjne dążą między innymi do (Loska, 2011):

- wydłużaniu czasu efektywności eksploatacyjnej;
- skracaniu czasu przywracania zdatności systemu technicznego;
- zwiększaniu trwałości i niezawodności;
- zmniejszaniu zużycia materiałów eksploatacyjnych takich jak paliwo, oleje, smary i inne nośniki energii;
- optymalizacji gospodarowania częściami zamiennymi;
- optymalizacji przepływu informacji;
- szkolenia specjalistycznego personelu;
- formułowania zaleceń i kryteriów poprawy przyszłych systemów technicznych dla procesów projektowania i konstruowania oraz wytwarzania środków technicznych,
- usprawniania metod użytkowania (polepszanie bezpieczeństwa pracy pracowników, eliminację zagrożeń środowiska).

2.2.2 Procesy eksploatacji systemów technicznych

Obiekt techniczny znajduje się w trakcie eksploatacji w jednym z k wyróżnionych stanów eksploatacyjnych $B = \{1, 2, ..., k\}$ określonych przez zbiór atrybutów W. Często, w wielostanowym modelowaniu niezawodności, stany eksploatacyjne sortowane są od „najgorszego" (stan niezdatności) do najlepszego (stan zdatności). Proces eksploatacji jest funkcją przypisującą chwili *t* stan eksploatacyjny $B(t)$. W najogólniejszym ujęciu, stany eksploatacyjne to użytkowanie i obsługiwanie, wiążące się odpowiednio ze stanami zdatności i niezdatności (rys. 2.11). Przedstawiony schemat systematyzuje i ułatwia identyfikację obiektów biorących udział bezpośrednio i pośrednio w eksploatacji technicznego obiektu badań.



Rysunek 2.11 System eksploatacji jako układ działania.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Młyńczak, 2012*)

Proces użytkowania przebiega przez wszystkie stany, w których mogą być realizowane funkcje użytkowe obiektu technicznego. Proces ten zdekomponowany do niższego poziomu (ze względu na funkcje składowe obiektu) może obejmować stan i odpowiadający mu czas oczekiwania na pracę, stan i odpowiadający mu czas pracy. System obsługiwania dotyczy: zbioru elementów systemu obsługiwania (np. mechanicy), przedmiotu obsługiwania (np. elementy wymienne maszyn i urządzeń) oraz infrastrukturę (np. bazę obsługiwania). Na otoczenie eksploatowanego systemu mogą się składać obiekty wpływające bezpośrednio lecz jednocześnie nie będące pod wpływem tego systemu (np. obca infrastruktura techniczna)(Młyńczak, 2012). W trakcie fazy eksploatacji systemu technicznego szczególnie istotną rolę odgrywa czas poprawnej pracy, zwany stanem zdatności systemu technicznego. Przeciwnym stanem jest stan niezdatności, w wyniku którego następuje przerwanie funkcji spełnianej przez system techniczny z powodu uszkodzenia. W eksploatacji uszkodzenia charakteryzuje (Młyńczak, 2012):

- postacią, tj. sposobem, w jaki zauważa się uszkodzenie;
- przyczyną, czyli pierwotnym zjawiskiem prowadzącym do uszkodzenia;
- skutkiem oznaczającym rodzaj i wielkość strat wynikających z uszkodzenia;
- sposobem naprawy, sposobem przywrócenia obiektu do stanu zdatności.

Uszkodzenie postrzegane jest na różnych poziomach dekompozycji oraz z różną szczegółowością. Prowadzi to do wyznaczenia zbioru niezbędnych informacji identyfikacyjnych i opisowych tworzących bazę danych o uszkodzeniach.

Skutki uszkodzeń mogą być kojarzone z komponentami obiektu zgodnie z przyjętym stopniem dekompozycji, a klasyfikowane na poziomie całego obiektu odnoszą się do zdatności obiektu, wydajności lub sprawności w odniesieniu do głównej funkcji obiektu (stopień realizacji funkcji). Często rozróżniane są efekty uszkodzeń od ich skutków. Efekt jest pojedynczym zdarzeniem bezpośrednio związanym z obiektem, traktowanym jako dowolna zmiana stanu technicznego wywołana uszkodzeniem.

Tabela 2.4. Klasyfikacja opisów uszkodzenia według różnych kryteriów.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Legutko, 2004*)

Kryterium	**Kryterium**	**Opis uszkodzenia**
1	Miejsce obiektu w systemie eksploatacji	• poziom złożoności uszkodzonego obiektu • relacje funkcjonalne • struktura niezawodnościowa • struktura bezpieczeństwa
2	Faza zakłóconego procesu eksploatacji	• parametry stanu (wielkości geometryczne, wielkości fizyczne, własności materiałowe, itp.) • wartości krytyczne parametrów stanu • czasy przebywania w stanach: wymagane, rzeczywiste
3	Charakterystyka częstości pojawienia się uszkodzenia	• czas do/między uszkodzeniami (wartości liczbowe, rozkłady prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia) • intensywność uszkodzeń
4	Charakterystyka czasu odnowy	• czasu odnowy (wartości liczbowe, rozkłady prawdopodobieństwa czasu naprawy) • czasy faz odnowy (diagnostyki, demontażu, naprawy, regeneracji, wymiany, montażu, sprawdzenia)
5	Przyczyna uszkodzenia	• pierwotna/ wtórna • starzenie, degradacja, człowiek, otoczenie • przekroczenie dopuszczalnego obciążenia, obniżenie wytrzymałości
6	Rodzaj uszkodzenia	• złamanie, zgięcie, przebicie, zatarcie, nadmierny luz • brak ruchliwości, nadmierna ruchliwość
7	Skutek uszkodzenia	• zagrożenie dla ludzi, środowiska • utrata obiektu • strata produkcji • uszkodzenie wtórne innych obiektów
8	Sposób odnowy	• wymiana • regeneracja • regulacja

		• naprawa złożona
9	Koszt bezpośredni i pośredni związany z uszkodzeniem	• koszt utraty obiektu • koszt utraty funkcji (koszt utraconej produkcji, usługi, zaburzenie działania innych systemów) • koszt odszkodowań zdrowotnych, środowiskowych

Skutki (szkody) są wynikiem logicznego ciągu zdarzeń po uszkodzeniu i oddziałują na obiekt i system eksploatacji. W odniesieniu do systemów technicznych o dużym znaczeniu, skutki uszkodzeń klasyfikuje się w cztery kategorie stosownie do zasięgu wpływu wywołujących je uszkodzeń (tab. 2.4)

Właściwa identyfikacja pojęcia i opisu uszkodzeń pozwala przyjąć strategię eksploatacyjną w celu wydłużenia cyklu życia systemu technicznego.

2.2.3 Strategie eksploatacji systemów technicznych

Strategie eksploatacyjne dotyczą ustalenia sposobu prowadzenia użytkowania i obsługiwania maszyn a także zachodzących relacji między nimi w oparciu o przyjęte kryteria. Wyróżnia się następujące strategie eksploatacji w oparciu o które budowany jest system eksploatacji przedsiębiorstwa (Żółtowski, 1996):

Strategia według niezawodności dotyczy oceny stanu maszyn w wparciu o wyniki okresowej kontroli poziomu niezawodności pracujących maszyn (miary niezawodnościowe), aż do momentu uszkodzenia. Strategia według niezawodności do oceny wykorzystuje metody statystyczne.

Strategia efektywności ekonomicznej, w której decyzje podejmowanie są w oparciu o wskaźnik zysku. Podstawą podejmowania decyzji są dane o niezawodności, kosztach użytkowania i napraw eksploatowanych maszyn. Opłacalność maszyny jest podstawą do zakwalifikowania jej do fazy użyteczności lub likwidacji. Bywa też, że w oparciu o to kryterium przedsiębiorstwo wycofuje maszynę w wyniku niezadowalających efektów lub zmiany asortymentu produkowanych produktów. Właściwe stosowanie tej strategii wymaga gromadzenia dużej ilości informacji statystycznych dotyczących eksploatacji obiektu, a także wiedzy dotyczącej mierników i wskaźników efektywności ekonomicznej.

Strategia według ilości wykonywanej pracy, odnosi się do liczby godzin pracy, ilości zużywanego paliwa lub zużywania się materiałów smarujących, liczbą cyki pracy czy liczbą przejechanych kilometrów. Zasadą strategii jest zapobieganie uszkodzeniom poprzez stosowanie obsługi maszyn i urządzeń w określonych przedziałach czasu przed osiągnięciem poziomu

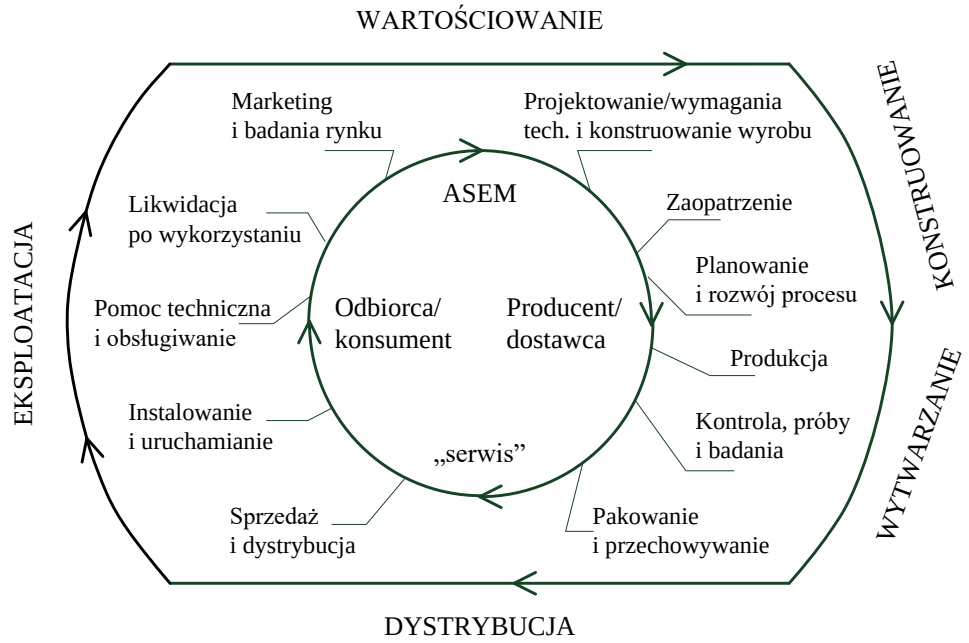
granicznego zużycia. Postępowanie zgodnie z ta strategia wydaje się być mało efektywne ponieważ przyjmuje ona ekstremalne warunki pracy z maszyna, które w nierównym stopniu mogą ujawnić się w trakcie procesu eksploatacji. Do wad strategii należy:

- planowanie prac konserwacyjno-naprawczych w oparciu o ogólne normy i niezależnie od aktualnego stanu technicznego;
- sztywne struktury cykli naprawczych odbiegające od realnych potrzeb; postępowanie zgodnie z przyjętymi standardami uniemożliwiających realizacje inicjatyw personelu obsługowego oraz dostosowanie do postępu technicznego;
- niska efektywność wykorzystania potencjału użytkowanych maszyn; trudności w ustaleniu optymalnego czasu eksploatacji maszyn prowadzący do wzrostu kosztów.

Strategia według stanu technicznego maszyn, która umożliwia eliminacje podstawowych wad maszyn i jej elementów. W tej strategii analiza polega na ocenie mierzonych symptomów stanu przy pomocy metod i środków diagnostyki technicznych oraz wykwalifikowanego personelu. Warunkiem powodzenia strategii jest dostępność prostych i skutecznych metod diagnostycznych, najlepiej wbudowanych w wytworzone maszyny, które są nadzorowane w systemie monitorowania stanu. W oparciu o te strategie przedsiębiorstwo tworzy system obsługiwani technicznych maszyn, który zawiera:

- system wymian profilaktycznych zbudowany w oparciu o strategie według efektywności;
- planowo–zapobiegawczy system obsług profilaktycznych, budowany głównie na strategii według ilości wykonywanej pracy (z góry zaplanowana strategia naprawcza niezależna od aktualnego stanu i potrzeb eksploatowanych maszyn);
- system obsługiwań technicznych według stanu, gdzie częstotliwość i zakres obsługi wyznaczony jest w oparciu o aktualny stan techniczny maszyny.

Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn – idea strategii oparta jest na zastosowaniu „pętli" jakości uzupełnionej o elementy eksploatacji (cykl życia maszyny i serwis), a także na diagnostyce technicznej. Strategia imiennie wskazuje twórcę i odpowiedzialnego za wyrób (od zamysłu, konstrukcji, wytwarzania, eksploatacji, aż do likwidacji i utylizacji). Producent jest także odpowiedzialny za serwis obsługowy w trakcie eksploatacji oraz jego diagnostykę techniczną. Na rysunku 2.12 przedstawiono koncepcje strategii proponowaną przez Żółtowskiego (Żółtowski, 2012).



Rysunek 2.12. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn ASEM.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski, 2012*)

Wybór strategii obsługowej, jeśli nie jest narzucony przez wytwórcę, odbywa się głównie na drodze obserwacji uszkodzeń post factum. Oznacza to, że tworząca się baza danych umożliwia w późniejszym okresie na analizowanie trendów i relacji skutkujących w propozycjach aktywnych modeli obsługowych.

2.3 Ocena efektywności eksploatacji systemu technicznego

2.3.1 Pojęcie efektywności eksploatacji systemów technicznych

Literatura związana z oceną efektywności systemów technicznych wskazuje wiele pojęć dotyczących niniejszego zagadnienia. Można wyróżnić dwa główne kierunki. Pierwszy nurt prezentuje podejście ekonomiczne określając wskaźniki poniesionych nakładów finansowych w stosunku do zysków. Drugie podejście jest ściśle techniczne pomijające częściowo lub całkowicie aspekty ekonomiczne.

Nauka o efektywności wywodzi się z prakseologii, gdzie pojęcie to jest równoznaczne ze skutecznością i sprawnością. Kotarbiński (1982) samą prakseologię opisywał jako „*ogół ocen sprawności mających walor we wszystkich zawodach, zarówno tedy w rzemiosłach, jak w hodowli roślin, medycynie, przemyśle, obronie wojskowej, administracji publicznej, szkolnictwie, teatrze, itp.*”. I dodaje: „*skuteczność jest to stopień osiągania celu, natomiast do skuteczności nie wchodzą skutki pożyteczne, lecz przez cel nieprzewidziane, w takim razie efektyw-*

ność nie jest nie jest poszczególnym przypadkiem skuteczności, gdyż efektywność dotyczy przecież nie tylko samych zamierzonych efektów, ale w ogóle tych, które wypadły w konsekwencji, niezależnie od tego czy je kto zamierzał, czy nie zamierzał, o ile tylko wypadły pozytywnie, a nie negatywnie".

Efektywność jest więc rozumiana w różny sposób w zależności od dziedziny i warunków, w których jest szacowana. Według słownika języka polskiego, efektywność oznacza pozytywny wynik, skuteczność i sprawność (Słownik PWN, 1996).

Efektywność nie powinna jednak zastępować pojęcia sprawności. Skuteczność jest określana powszechnie jako relacja celu do efektów, natomiast pojęcie efektywności odnosi się do efektów w stosunku do poniesionych nakładów. Dodatkowo, pojęcie efektu jako składowego elementu efektywności, opisuje nie tylko uzyskany poziom realizacji zamierzonego celu, ale również wszelkie inne niezamierzone skutki wpływu czynników zewnętrznych i wewnętrznych na system techniczny.

Juran i Gryna (1976) efektywność opisali jako funkcję dyspozycyjności (gotowości), niezawodności i zdolności potencjalnej systemu. Definicja ta jednak nadmiernie upraszcza związek efektywności z przebiegiem procesu eksploatacji. Według Pszczołowskiego (1977), efektywność jest rozumiana jako „dodatnia cecha działań dających jakiś oceniany pozytywnie wynik, bez względu na to czy był on zamierzony, czy niezamierzony".

Bojarski (Juran i Gryna, 1976) efektywność opisywał następująco: "W najbardziej globalnym ujęciu, miarą efektywności społeczno-gospodarczej rozwiązania technicznego (systemu) jest wpływ tego rozwiązania na realizację nadrzędnego celu społeczno-gospodarczego państwa (…) coraz częściej pojawia się nowe uogólniające pojęcie kosztu społecznego, związanego w domyślny sposób z pojęciem jakości życia (…). Na razie brak tu jeszcze bliższych definicji (…). Ocena efektywności społeczno-gospodarczej nie jest możliwa bez definicji uogólnionych kosztów społecznych (…). Przez koszt społeczny przyjmuje się tutaj rozumieć każde obniżanie jakości życia społeczeństwa. W tym rozumieniu kosztem społecznym jest każde wydatkowanie wytworów społecznych czy walorów finansowych, umniejszanie zasobów naturalnych lub degradację środowiska (…). Przez efekt społeczny przyjmuje się tutaj rozumieć przeciwieństwo kosztu społecznego, a więc każde podwyższenie jakości życia społecznego".

Kolejna z definicji efektywność rozpatruje przez pryzmat jakości pracy złożonego systemu poprzez wykorzystanie wskaźników efektywności o charakterze liczbowym, określającym stopień przystosowania systemu do realizacji zamierzonych zadań. Najogólniej opisując

pojęcie efektywności, jest ona stosunkiem efektów uzyskanych w wyniku określonego działania do nakładów poniesionych na to działanie (Mazur i Małek, 1979).

Teoria i praktyka w zależności od przeznaczenia stosuje różne pojęcia definicji. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć podział na efektywność techniczną, ekonomiczną i społeczną. Z uwagi na charakter pracy, ograniczono się do opisu technicznej efektywności. Techniczne aspekty efektywności dotyczą środków i przedmiotów pracy, tj.: maszyn, urządzeń, systemów technicznych, narzędzi, materiałów i surowców, które określa się za pomocą danych technicznych oraz mierzy w oparciu miary techniczne.

Żółtowski efektywność systemu technicznego zdefiniował jako cechę stanowiącą podstawowe porównywanie systemów tej samej klasy, wyrażaną w różny sposób w zależności od klasy systemów, ich celów (przeznaczenia) oraz warunków działania (Żółtowski, 2012).

Efektywność w ujęciu ilościowym (Antosz i Stadnicka, 2015) jest ilorazem (lub różnicą) efektów uzyskanych w ustalonym przedziale czasu trwania określonego stanu obiektu eksploatacji, do nakładów poniesionych na uzyskanie tych efektów.

Efektywność systemu technicznego można także zdefiniować jako zdolność do wykonywania w określonym czasie, za pomocą danych właściwości realizacyjnych, niezbędnej ilości zadań zapewniających zaspokojenie potrzeb użytkownika, lub jako stopień przystosowania urządzenia do spełnienia określonej funkcji w danych warunkach (Mazur i Małek, 1979). Efektywność systemu w rozumieniu tej definicji określa wpływ poszczególnych parametrów na zdolność obiektu do realizacji wyznaczonego zadania. Efektywność systemu można opisać przez:

- cechę określonego działania i jego oceną w oparciu o stawiane cele;
- ocenę działań wyrażającą wyniki czyli efekty uzyskane oraz poniesione nakłady na realizacje zadania;
- zastosowanie miar do oceny poniesionych nakładów w stosunku do uzyskanych korzyści;
- ocenę funkcjonalną systemu, która odbywa się na etapie jego eksploatacji;
- poniesione na etapie początkowym nakłady na efektywność po to aby system mógł zaistnieć i był bezpieczny dla jego użytkowników;
- wpływ samego systemu na jego efektywne funkcjonowanie oraz sposób i czas jego eksploatacji;
- efektywność nie jest niezawodnością ani tez jakością systemu.

Do najczęściej spotykanych miar w przedsiębiorstwie zalicza się jednostkę pieniężną określająca koszt poniesionych nakładów do otrzymanych rezultatów np. koszt inwestycji. Inną

również popularna miarą jest prawdopodobieństwo realizacji zadania stawianego systemowi, która jest szczególnie istotna jest w przypadku bezpieczeństwa funkcjonowania systemu.

W systemach eksploatacji efektywność jest określana jako właściwość do spełniania wymagań w kontekście niezawodnościowym, ekonomicznym, jakościowym, sprawnościowym wydajnościowym i środowiskowym. Tak rozumiane pojęcie efektywności sprowadza się wg Brandowskiego (1990) do definicji efektywności w formie opisowej oraz w normatywnej, gdzie:

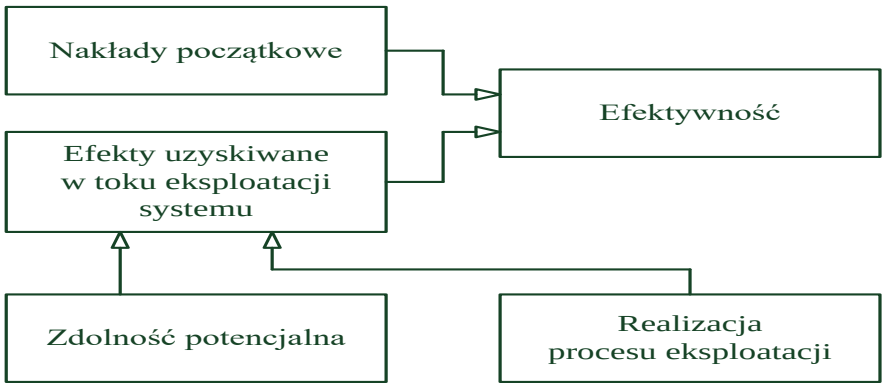
1. Efektywność systemu technicznego w sensie opisowym stanowi łączną cechę systemu i procesu jego eksploatacji, wyrażającą ocenę skutków zastosowania systemu.
2. Efektywność systemu technicznego w sensie normatywnym stanowi stopień realizacji zadań stawianych systemowi, mający miejsce w określonych warunkach eksploatacji i w określonym przedziale czasu.

Właściwa interpretacja pojęcia efektywności wymaga wyjaśnienia relacji zachodzących z niezawodnością. Niezawodność w ogólnym rozumieniu jest zdolnością systemu technicznego do zachowania zdatności do realizacji stawianych przed nim zadań. Zdolność odnosi się do odporności systemu na czynniki wpływające na proces starzenia oraz jego podatności przywrócenia do pełnej sprawności. Rozróżnienie pojęć efektywności i niezawodności pozwoliło autorowi rozprawy na przyjęcie definicji efektywności technicznej (Antosz i Stadnicka, 2015) systemu w fazie eksploatacji, która opisuje ***„relację pomiędzy uszkadzalnością a jego potencjalną zdolnością do wykonywania zadań w systemie”***.

Pojęcie efektywności w oparciu o zależności wpływające na działanie systemu opisuje wpływ nakładów początkowych w stosunku do uzyskanych efektów na etapie eksploatacji. Uzyskane efekty zależne są od zdolności systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych. Czynniki wpływające na zdolność systemu technicznego do realizacji swoich funkcji dotyczą sposobu eksploatacji, ograniczeń niezależnych bezpośrednio (np. brak prądu) oraz stanu technicznego samego obiektu. Stan zdatności, a tym samym zdolność systemu technicznego do spełniania określonych funkcji, zależy od:

- wystąpienia potrzeby realizacji zadania (zamówienie);
- dostępu systemu do mających bezpośredni wpływ systemów współpracujących (obsługi, źródeł zasilania, informacji, wpływu na środowisko);
- możliwości szybkiej reakcji na przywrócenie systemu do stanu zdatności (stosowane części zamienne).

Wpływ zachodzących relacji można przedstawić jako model efektywnościowo–niezawodnościowy określający czynniki przyczyniające się do potencjalnej zdolności systemu (rys. 2.13).



Rysunek 2.13. Czynniki kształtujące efektywność systemu technicznego.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Brandowski, 1990*)

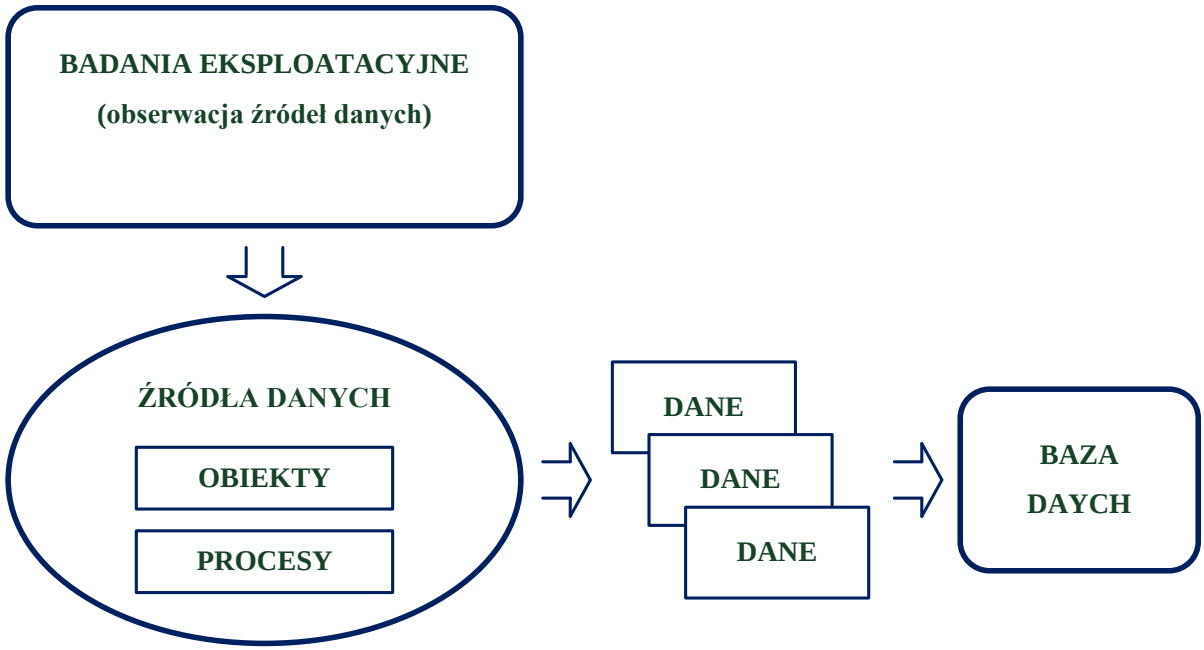
Pokazane na rysunku 2.13 czynniki kształtujące efektywność systemu technicznego, można podzielić na te, które opisują sposób eksploatacji systemu technicznego, również te, które wpływają na ograniczenie jego efektywności z przyczyn leżących poza systemem oraz na stany niezawodnościowe w wyniku realizacji założonych zadań wobec systemu technicznego.

Podstawą do wykonania analizy i dokonania oceny efektywności systemu technicznego jest właściwy dobór informacji w oparciu o które można wyznaczyć czynniki wpływające na jego niezawodność. W celu wyciagnięcia właściwych wniosków dotyczących efektywności eksploatacyjnej systemu technicznego należy skrupulatnie zapisywać wszelkie dane, zarówno odnoszące się do wykorzystania, jak i przejść ze stanu zdatności do niezdatności.

2.3.2 Dane i informacje dotyczące efektywności eksploatacji

Efektywne zarządzanie eksploatacją systemów technicznych wymaga ciągłego lub okresowego pozyskiwania informacji, które można określić, jako: informacje operacyjne stanowiące podstawę do bieżącego sterowania procesami lub informacje alarmowe (awaryjne) powiadamiające o nieprawidłowym działaniu systemu. Informacje awaryjne stanowią podstawę do podejmowania decyzji kryzysowych i tworzenia statystycznej oceny pojawiających się zdarzeń niepożądanych. Cel badań eksploatacyjnych jest zorientowany przede wszystkim na wyznaczenie miar i ocenę obiektu technicznego eksploatowanego w określonym systemie eksploatacji według założonego procesu eksploatacji. Natomiast wynik oceny jest bezpośrednią informacją w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych, czyli w zarządzaniu eksploatacją. Obszar mapowania obiektów technicznych jest związany z problematyką eksploatacyjną i

dostarcza danych w postaci obrazu zjawisk eksploatacyjnych z wykorzystaniem pewnej procedury obserwacyjnej (badanie eksploatacyjne), odwzorowującej właściwości obiektu (ich atrybuty) poprzez wartości pewnych zmiennych (Młyńczak, 2012). Związki między obiektami reprezentowane są przez liczbowe relacje między zmiennymi i gromadzone w bazach danych podlegających w dalszej kolejności przetwarzaniu w celu ujawnienia tych związków (rys. 2.14)



Rysunek 2.14. Pozyskiwanie danych eksploatacyjnych.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Młyńczak, 2012*)

Rodzaj wykorzystywanych danych zależny jest od: możliwości i kosztu ich pozyskania, potencjalnego zastosowania w procesie decyzyjnym, wiarygodności, czasu dostępu itp. Dla przykładu do najważniejszych rodzajów danych stosowanych w analizie RAMS (ang. Reliability, Availability, Maintainability, Safety) zalicza się:

- dane historyczne, istniejące dla podobnych obiektów, z wcześniejszych badań;
- dane z komercyjnych banków danych gromadzone w profesjonalnych bazach danych;
- dane literaturowe, poradnikowe pochodzące z opublikowanych wyników badań;
- dane eksperckie uzyskiwane poprzez odpytywanie kadry inżynierskiej, obarczone pewnym subiektywizmem zależnym od doświadczenia eksperta;
- dane próbkowe, wyrywkowe będące wynikiem obserwacji rynkowych, ankiet itp.;
- dane badawcze ze specjalnie zaprojektowanych badań eksploatacyjnych;
- dane obserwacyjne pochodzące z nieformalnych obserwacji eksploatacyjnych;
- dane produkcyjne z końcowych etapów kontroli jakości i testów przedsprzedażnych.

W zależności od przyjętych kryteriów, dane o eksploatacji obiektów można sklasyfikować jako (Młyńczyk, 2012):

- dane identyfikacyjne, stałe, odnoszące się do obiektów na wyższym poziomie złożoności (przedsiębiorstwo, instalacja, stałe numery identyfikacyjne, daty instalacji, modyfikacji, kasacji, specjalne właściwości i akcesoria);
- dane o bieżącym użytkowaniu (regularne, generowane w procesie użytkowania);
- dane o losowych zakłóceniach eksploatacyjnych (uszkodzenia, naprawy, obsługi profilaktyczne, modernizacje).

Dokonując oceny funkcjonalności parków maszynowych należy wyznaczyć miary i wskaźniki w oparciu o które przedsiębiorstwo może planowo realizować założone zadania wobec systemów technicznych. Do tego celu stosuje się ogólnie dostępne miary lub w oparciu o własną wiedzę, wskaźniki dopasowane do specyfiki przedsiębiorstwa.

2.3.3 Miary efektywności eksploatacji systemów technicznych

Realizacja działań dotyczących eksploatacji maszyn i urządzeń (Florek i Barczak, 2004) jest procesem ciągłego podejmowania decyzji, a tym samym procesem świadomego wyboru jednego z rozpoznanych i uznanych za możliwe wariantów przyszłego działania. Poprawne zdefiniowanie wskaźnika efektywności systemu technicznego wymaga określenia przedmiotu pomiaru. Oznacza to, że badane cechy zostały zmierzone na przykład za pomocą wartości liczbowej lub według stopnia natężenia określonej cechy. Wśród wskaźników wyróżnia się miary cząstkowe stałe i zmienne. Miary cząstkowe stałe odnoszą się do włożonych nakładów początkowych na budowę obiektu oraz jego wdrożenie na produkcji i są niezależne od dalszego przebiegu procesu eksploatacji. W drugim przypadku będą to miary zmienne, ponieważ zależą one od zmiennego procesu eksploatacji i dotyczą prawdopodobieństwa występujących zdarzeń i relacji zachodzących w trakcie użytkowania systemu technicznego.

Wybór oceny modelu odnosi się bezpośrednio do eksploatowanego systemu technicznego, działań realizowanych z jego udziałem oraz techniczno-organizacyjnego otoczenia. Doboru właściwych miar należy dokonywać w oparciu o (Loska, 2011; Żółtowski, 1996):

- stan techniczny, będący miarą możliwości eksploatowania obiektu w określonym czasie;
- niezawodność, opisującą gotowość obiektu do działania w ujęciu statystycznym;
- jakość, określającą zdolność obiektu do zaspokojenia potrzeb;
- funkcjonalność, odnoszącą się do relacji maszyny z człowiekiem;

- efektywność, odnoszącą się do funkcjonalności;
- obsługiwalność, opisująca podatność obiektu na wykonywanie czynności obsługowych;
- diagnozowalność, określającą podatność obiektu na pozyskiwanie informacji o stanie technicznym.

Ogólną ocenę efektywności procesu eksploatacji maszyn i urządzeń w wielu przypadkach w dostatecznym stopniu można uzyskać w oparciu o wykorzystanie wskaźników syntetycznych (Mazur i Małek, 1979), tj.:

- wskaźnik wykorzystania jednej maszyny, linii produkcyjnej lub ogólne wykorzystanie całego parku technologicznego;
- wskaźniki dotyczące wydajności urządzeń;
- wskaźniki rentowności.

Loska (2011) wśród współczesnych modeli, stanowiących podstawę ilościowej oceny eksploatacji systemów technicznych, wyróżnił miary najczęściej opisywane w literaturze z poziomu teoretycznego i użytkowego i są nimi:

- model niezawodnościowy;
- model efektywności eksploatacyjnej (ang. Overall Equipment Effectiveness);
- model organizacyjno-techniczny (ang. Key Performance Indicators).

Miary w modelu niezawodnościowym

Modele niezawodnościowe pozwalają na wyznaczenie miar eksploatacyjnych w ujęciu statystycznym w których decyzje dotyczące użytkowania, zakresu prac i terminy obsługowo–naprawcze wynikają z czasowej oceny funkcjonowania systemów technicznych. Realizacja zadań użytkowych i obsługowych opiera się o z góry ustalone kryteria wynikające z miar niezawodnościowych. Mary można podzielić na dwie grupy wskaźników:

1. Wskaźniki eksploatacji systemów technicznych w ujęciu technicznym, wyrażone w postaci prawdopodobieństwa stanu w którym się aktualnie znajduje do innych stanów w których może się znajdować.
2. Wskaźniki eksploatacji systemów technicznych w ujęciu organizacyjno-technicznym określające bieżący stan i ocenę działalności organizacyjnej oraz ekonomicznej służb utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie.

W pierwszej grupie stosowane są miary niezawodnościowe, takie jak: efektywność, nieuszkadzalność, obsługiwalność, gotowość, naprawialność, odpowiedniość, niezawodność operacyjna i niezawodność bezpieczeństwa. Najważniejszą z miar jest funkcja niezawodności.

Tabela 2.5. Klasyfikacja wybranych miar niezawodności.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Chybowski, 2011*)

Miary niezawodności w analizie Złożonych Systemów Technicznych	Miary efektywności	Średnie prawdopodobieństwo wykonania zadania
		Średni zysk eksploatacyjny
		Średnie straty eksploatacyjne
		…
	Miary nieuszkadzalności/ uszkadzalności	Niezawodność
		Zawodność
		Intensywność uszkodzeń
		Skumulowana intensywność uszkodzeń
		Gęstość prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia
		Średni czas do uszkodzenia
		…
	Miary niezawodności operacyjnej/ zawodności operacyjnej	Niezawodność operacyjna
		Zawodność operacyjna
		…
	Miary bezpieczności/ niezawodności bezpieczeństwa/ zawodności bezpieczeństwa	Niezawodność bezpieczeństwa
		Zawodność bezpieczeństwa
		…
	Miary gotowości/ niegotowości	Gotowość
		Niegotowość
		…
	Miary obsługiwalności	Średni czas trwania obsługi
		Średni czas między obsługami
		…
	Miary niesprawności	Średni czas naprawy (odnowy)
		Intensywność napraw (odnów)
		…
	Miary odpowiedniości/ funkcjonalności	Odpowiedniość
		Zysk realizacji określonego zadania
		…

Wybrane miary zostały opisane przez autora rozprawy w części dotyczącej niezawodności. Klasyfikację miar niezawodności dotyczących systemów technicznych dokonano w pracy (Chybowski, 2014) i zestawiono w tabeli 2.5.

Chybowski (2014) uważa, że w odniesieniu do systemu jako całości, podstawowe miary niezawodnościowe (gotowość, niezawodność, średni czas do uszkodzenia itp.) mają istotną

wartość informacyjną w aspekcie poprawiania działania systemu, jednak w przypadku elementów systemu, miary te dają tylko ogólną informację o ich uszkadzalności i nie zapewniają wystarczająco dokładnego opisu oddziaływania elementu na system.

Wskaźniki KPI

Druga grupa miar oceny efektywności odnosi się do finansowych i niefinansowych wskaźników efektywności KPI (ang. Key Performance Indicators).), które stosuje się do oceny funkcjonowania parków maszynowych w przedsiębiorstwie. Pozwalają wykorzystać gromadzone przez przedsiębiorstwo informacje na temat eksploatacji obiektów technicznych do diagnostyki realizowanych działań utrzymania ruchu poprzez (Biały i Hąbek, 2016):

- pomiar stanu obiektu i służb ds. eksploatacji;
- przedstawienie bieżących i historycznych wartości miar właściwości eksploatacyjnych oraz relacji między nimi;
- porównywania wewnętrznych i zewnętrznych działań służb ds. eksploatacji;
- diagnozowania słabych punktów w działaniach utrzymania ruchu;
- śledzenie zmian i postępu w systemie eksploatacji;
- wdrożenie procesu ciągłego doskonalenia poprzez wyszukiwanie i eliminację odchyleń od założonych wartości;
- stały nadzór nad zmianami organizacyjno-technicznymi.

Wskaźniki KPI dla utrzymania ruchu ujęte zostały w normie PN-EN 15341:2007 (2007) Maintenance–Maintenance Key Performance Indicators, opracowanej przez Europejski Komitet Normalizacji (CEN), która zawiera ujednolicony zbiór miar. Norma zawiera 72 miary wraz z szczegółowym opisem ich elementów, które zostały podzielone według następujących kryteriów:

a) Typ decyzji, czyli działania podejmowane przez służby utrzymania ruchu:

- miary (wskaźniki) ekonomiczne, wyrażające kosztową wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego;
- miary (wskaźniki) techniczne, wyrażające czasową wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego;
- miary (wskaźniki) organizacyjne, wyrażające około eksploatacyjną wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego.

b) Poziom decyzji (Adamkiewicz i Burnos, 2012):

- 1–wszy poziom opisujący wskaźniki na poziomie ogólnym;

- 2–gi poziom opisujący wskaźniki na poziomie pośrednim;
- 3–ci poziom opisujący wskaźniki na poziomie szczegółowym.

Korzystając z oznaczeń zastosowanych w normie PN-EN 15341:2007, podział wskaźników pokazano w tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Struktury wskaźników KPI.
(*Źródło: opracowano na podstawie: PN-EN 15341:2007*)

	Wskaźniki techniczne	**Wskaźniki ekonomiczne**	**Wskaźniki organizacyjne**
Poziom ogólny (park maszynowy w przedsiębiorstwie)	T1, T2, T3, T4	E1, E2, E3, E4, E5, E6	O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8
Poziom pośredni (linia produkcyjna)	T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16	E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E14	O9, O10
Poziom szczegółowy (agregat)	T17, T18, T19, T20, T21	E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22, E23, E24	O11, O12, O13, O14, O15, O16, O17, O18, O19, O20, O21, O22, O23, O24, O25, O26

Norma wskazuje wskaźniki, które można uznać jako najistotniejsze i precyzuje sposób właściwego ich doboru z uwzględnieniem kryterium wyboru (tab. 2.7.):

- dobór wskaźników spośród dostępnych;
- wybór metody w oparciu o analizę funkcyjną różnych procesów utrzymania maszyn.

W przedsiębiorstwach w odniesieniu do zarządzania i nadzoru nad eksploatowanymi systemami technicznymi dąży się do uzyskania odpowiedzi na temat niezawodności, obsługiwalności i efektywności. Wśród dostępnych wskaźników KPI najpopularniejsze z nich to dostępność (ang. Availability), MTBF (ang. Mean Time Between Failure), MTTR (ang. Mean Time To Repair) oraz Mean Time To Failure (ang. MTTF).

Tabela 2.7. Wykaz niektórych miar określonych przez normę.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Loska,2011*)

Miary techniczne	Miary ekonomiczne	Miary organizacyjne
Wskaźnik czasu usuwania awarii; Wskaźnik czasu działań korekcyjnych; Wskaźnik czasu działań prewencyjnych; Wskaźnik czasu działań diagnostycznych; Wskaźnik - Średni czas pomiędzy zdarzeniami uniemożliwiającymi normalne funkcjonowanie (MTBF); Wskaźnik średniego czasu działań związanych z naprawami (MTTR); Wskaźnik średniego czasu działań związanych z naprawami (MFOT); Wskaźnik dostępności obiektów eksploatacji; Wskaźnik efektywności działań eksploatacyjnych; Wskaźnik efektywności planowania działań obsługowo-naprawczych.	Wskaźnik kosztów działań odnoszony do ilości świadczonej produkcji; Wskaźnik kosztów działań i braku świadczonej usługi odnoszony do ilości świadczonej produkcji; Wskaźnik kosztów personelu odnoszony do sumarycznych kosztów eksploatacji; Wskaźnik kosztów zużycia zasobów materiałowych; Wskaźnik kosztów zużycia narzędzi i sprzętu specjalistycznego; Wskaźnik udziału kosztów czynności korekcyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji; Wskaźnik udziału kosztów czynności prewencyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji; Wskaźnik udziału kosztów czynności diagnostycznych w sumarycznych kosztach eksploatacji; Wskaźnik udziału kosztów awarii w sumarycznych kosztach eksploatacji.	Wskaźnik udziału pracowników utrzymania ruchu w ilości sumarycznej pracowników własnych firmy; Wskaźnik udziału ilości pracowników pośrednich w sumarycznej ilości pracowników utrzymania ruchu; Wskaźnik wykorzystania potencjału w procesie planowania; Wskaźnik ilości czynności przy których występują wypadki; Wskaźnik ilości czynności przy których występuje zagrożenie potencjalne wypadkiem; Wskaźnik ilości czynności przy których występuje zagrożenie dla środowiska; Wskaźnik ilości czynności przy których występuje potencjalne zagrożenie dla środowiska; Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania prewencyjne; Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania korekcyjne; Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania diagnostyczne; Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania związane z awariami; Wskaźnik nadgodzin pracowników utrzymania ruchu.

Miara dostępności

Model dostępności A systemów technicznych odnosi się do konkretnego obiektu lub całego parku maszynowego. Wartość jest również utożsamiana w Polce z gotowością K i rozróżnia się dostępność techniczną A_t oraz dostępność operacyjną A_o. Opisywany jest następującą zależnością (Adamkiewicz i Burnos, 2012):

$$A_t = \frac{T_{OT}}{(T_{OT} + T_{DT.M})} \tag{2.27}$$

$$A_o = \frac{T_{UT.t}}{t} \tag{2.28}$$

gdzie:

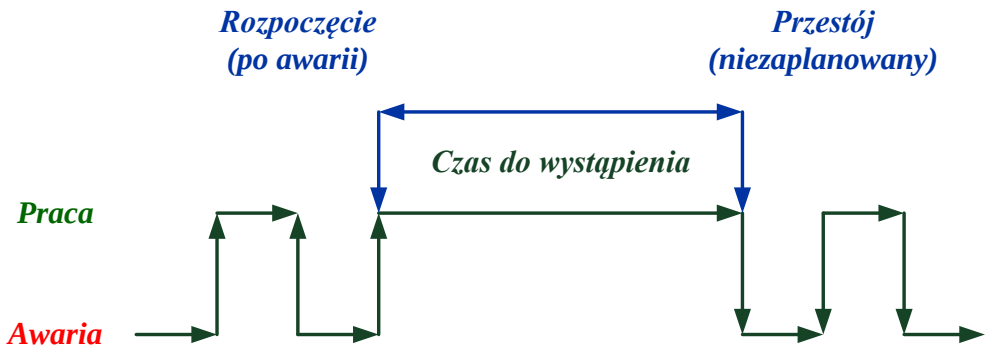
T_{OT} – całkowity czas pracy;

$T_{DT.M}$ – sumaryczny czas spoczynku spowodowany działaniami utrzymania;

$T_{UT.t}$ – czas zdatności w czasie t.

MTBF – średni czas pomiędzy niezdatnością systemu technicznego

Najczęściej stosowany wskaźnik pomiaru niezawodności (rys.2.15.) pokazującym średnią arytmetyczną czasów między awariami systemu. Miara zakłada, że system jest gotowy do pracy bezpośrednio po usunięciu awarii i jest dostępny do użytku (Pourjavad, i in., 2011; Szwedzka, i in., 2017).



Rysunek 2.15. Graficzna interpretacja wskaźnika średniego czasu pomiędzy awariami.
(*Źródło opracowanie własne na podstawie: Szwedzka i in., 2017*)

Miara opisana jest następującą zależnością:

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{2.29}$$

gdzie:

$MTTF$ – średni czas do wystąpienia niezdatności systemu technicznego;

$MTTR$ – średni czas odnowy systemu technicznego.

Wskaźnik MTBF pokazuje, jak często ze statystycznego punktu widzenia następują uszkodzenia danego obiektu technicznego. W przedsiębiorstwach wskaźnik ten służy do opracowywania harmonogramów przeglądów profilaktycznych.

MTTR – średni czas odnowy systemu technicznego

Miara ta jest najczęściej wykorzystywaną miarą efektywności utrzymania ruchu i mierzy średni czas, który jest potrzebny do wykonania działań naprawczych na wszystkich ruchomych częściach systemu. Wskaźnik ten określa informacje o przebytym czasie naprawy i konserwacji urządzenia (Pourjavad, i in., 2011).

$$MTTR = \frac{całkowity\ czas\ naprawy}{liczba\ napraw} \tag{2.30}$$

Zakres mierzonych czynności może być różny, jednak generalnie zawiera:

- czas, potrzebny dla prawidłowego zdiagnozowania przyczyny awarii;
- czas, niezbędny dla zamówienia i dostarczenia komponentów niezbędnych do naprawy awarii;
- czas, niezbędny dla uzyskania dostępu do uszkodzonej części;
- czas, niezbędny dla wymiany uszkodzonej części;
- czas, niezbędny do przywrócenia urządzeniu statusu operacyjnego;
- czas, niezbędny dla weryfikacji, czy urządzenie funkcjonuje zgodnie z jego specyfikacją.

MTTF – średni czas do wystąpienia awarii/wystąpienia stanu niezdatności systemu technicznego

Miara wskazuje średni czas pracy od rozpoczęcia eksploatacji systemu technicznego lub od czasu ostatniej konserwacji do momentu wystąpienia kolejnej niezdatności (Szwedzka i Jasiulewicz – Kaczmarek, 2016). Wskaźnik przedstawiany jest następująco

$$MTTF = \frac{dostepny\ czas\ pracy - czas\ awarii}{liczba\ zdarzeń} \tag{2.31}$$

Wskaźnik MTTF określa informację o czasie naprawy i konserwacji włączając w to między innymi, czas potrzebny na: prawidłowe zdiagnozowanie przyczyny wystąpienia stanu niezdatności, zamówienie i dostarczenie komponentów niezbędnych do usunięcia awarii, przywrócenia systemowi technicznemu statusu operacyjności. W przypadku wymiany uszkodzonych części zakłada czas niezbędny na dostarczenie niezdatnego elementu systemu technicznego.

OEE – całkowita efektywność sprzętu lub wskaźnik wykorzystania wyposażenia

W ocenie skuteczności podjętych działań stosowana jest Miara Efektywności Eksploatacyjnej (Overall Equipment Efectiveness – OEE). Wskaźnik OEE jest kluczowym identyfikatorem wydajności, stosowanym w strategii TPM (ang. Total Productive Maintenance) (Nakajima,

1988) i jest podstawową miarą efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń. Całkowitą efektywność maszyn i urządzeń stosuje się w celu oszacowania skuteczności wykorzystania maszyny w okresie planowania usprawnień oraz sprawdzenia, czy ich implementacja przyniosła rezultat. OEE porównuje maksymalną teoretyczną zdolność wytwórczą z rzeczywistą produkcją i wskazuje potencjał rozwojowy, definiując iloczyn trzech wskaźników cząstkowych (Hamrol, 2015; Mączyński, 2011; Antosz i Stadnicka, 2015):

- straty dostępności (awarie, przezbrojenia i regulacje), wyrażone procentowo jako stosunek czasu dostępnego do potencjalnego czasu dostępnego urządzenia, pomniejszonego o czas przezbrojeń i inne planowane przestoje maszyny. Spadek wielkości wskaźnika poniżej 100%, świadczy o awarii, przezbrojeniu lub ustawianiu maszyn;
- straty efektywności (wydajności) wykorzystania (praca jałowa lub półautomatyczna, brak materiału, zatrzymanie, uruchomienie), wyrażone procentowo interpretowane jest jako stosunek czasu pracy maszyny do czasu dostępności, pomniejszonego o czas np.: mikro-przestojów oraz tempa pracy niezgodnego z wyznaczoną normą dla maszyny. Stopień wykorzystania jest interpretowany przez przedsiębiorstwa jako zaniżanie straty prędkości wykonywanych operacji;
- straty jakości produkowanych wyrobów (braki, złom, poprawki, próby technologiczne), obliczane są procentowo jako stosunek czasu wytwarzania dobrych produktów do planowego czasu pracy. Bywa, że wskaźnik ulega obniżeniu wskutek problemów z wydajnością produkcji, na którą wpływają błędy ujawniające się w trakcie realizacji procesu technologicznego.

Stosowanie wskaźnika OEE umożliwia przedsiębiorstwu (Biały i Hąbek, 2016):

- poprawę wydajności maszyn;
- poprawę jakość produkowanych wyrobów;
- zwiększenie dostępności maszyn;
- unikanie zakupu dodatkowych maszyn;
- stałą kontrolę maszyn w procesie produkcyjnym;
- angażowanie wszystkich pracowników do dbania o stan maszyn;
- konkurowanie pomiędzy zespołami obsługującymi maszyny o osiągnięcie lepszego wyniku wskaźnika OEE;
- porównywanie przedsiębiorstw w ramach koncernu pod względem wykorzystania maszyn.

Wskaźnik OEE pomaga zarządzającym produkcją w ustaleniu priorytetów, w zakresie potrzebnych wysiłków w celu poprawy wyników działania. Poprzez porównanie rożnych maszyn zaobserwować można, w których miejscach zastosowanie dodatkowych zasobów będzie

najbardziej użyteczne dla udoskonalenia produkcji lub gdzie trzeba je ograniczyć dla lepszej wydajności. Gotowość (ang. availability), dostępność (ang. performance) i jakość (ang. quality) pokazują dlaczego efektywność jest mniejsza niż 100%. Uproszczony wzór (2.32) można przedstawić w postaci iloczynowej:

$$\text{OEE} = \text{AVAILABILITY} \times \text{PERFORMANCE} \times \text{QUALITY} \times 100\% \tag{2.32}$$

gdzie:

AVAILABILITY – wskaźnik gotowości technicznej;
PERFORMANCE – wskaźnik wydajności użytkowej;
QUALITY – wskaźnik jakości.

Składowe wskaźnika OEE wyznacza się za pomocą następujących wzorów (Biały i Hąbek, 2016):

- Dostępność (*D*) pokazuje w jakim stopniu dostępny czas, który można przeznaczyć na produkcję jest skracany poprzez inne nieplanowane zdarzenia określane jako straty na dostępności. Zależność oblicza się następująco:

$$D = \frac{t_e - t_b}{t_e} \tag{2.33}$$

gdzie:

t_e – dostępny czas eksploatacji systemu technicznego;
t_b – nieplanowane przestoje systemu technicznego.

Wykorzystanie (*O*) określa relacje między nominalna, a rzeczywistą prędkością systemu technicznego, który można przedstawić następująco:

$$O = \frac{t_w}{t_e - t_b} \tag{2.34}$$

gdzie:

t_w – czas wytworzenia wszystkich produktów (dobre + wadliwe).

W przypadku niniejszego wskaźnika, wynik może być wyższy niż 100%. Taka sytuacja występuje, ponieważ pracownik może wykonać szybciej pracę, niż jest to założone w procesie technologicznym. Może to być spowodowane zaniżeniem czasu obróbki, wysoką jakością obrabianego materiału lub ingerencją operatora w dobór parametrów pracy maszyny.

- Jakość (*J*) opisuje ilość wytworzenia dobrych wyrobów przez system techniczny. Zależność oblicza się następująco:

$$J = \frac{n_t - n_o}{n_t} \tag{2.35}$$

gdzie:

n_t – liczba wszystkich wyprodukowanych wyrobów;
n_w – liczba wyrobów niezgodnych.

Światowy wskaźnik OEE zakłada gotowość techniczną systemu technicznego na poziomie 90%, wykorzystanie za którym stoi wydajność na poziomie 95%, natomiast jakość stanowi 99%. Obliczając miarę całkowitej efektywności 90% × 95% × 99% oczekuje się efektywności na poziomie 85% (Vorne Industries, 2019). Dążenie do uzyskania takiego wskaźnika jest dążeniem do doskonałości wykorzystania parków maszynowych w przedsiębiorstwach.

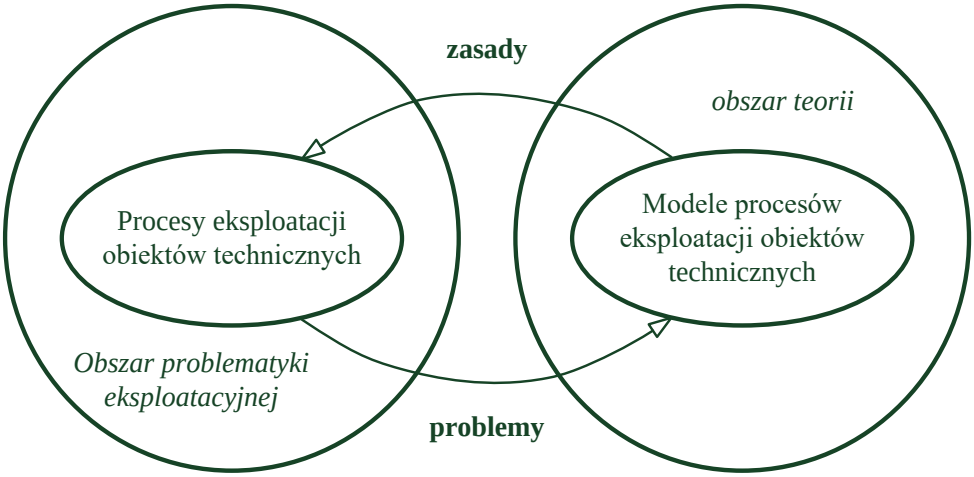
Chcąc odwzorować rzeczywisty proces eksploatacji, celem wyznaczenia poziomu niezawodności należy opracować model możliwie zbliżony do badanego systemu technicznego. Teoria modelowania procesów eksploatacji maszyn wskazuje na ich szeroką różnorodność. Można wyróżnić np. modele: fizyczne, matematyczne, rozmyte oraz neuronowe. Istotne jest, aby taki model odwzorowywał rzeczywisty system techniczny, dając nową wiedzę o obserwowanym obiekcie.

2.4 Modele efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych

2.4.1 Definicja modelu i modelowania

W teorii eksploatacji systemów technicznych przyjmuje się, że model jest to dający się pomyśleć lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania, zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nowej informacji o tym przedmiocie (Niziński, 2000).

Literatura tematu wskazuje wiele interpretacji znaczenia tego pojęcia, dlatego w tym opracowaniu przyjęto definicję z zakresu modelowania i eksploatacji, że ***model jest zastępującą oryginał, przyjętą formą reprezentacji, wykorzystywaną do wyjaśnienia i przewidywania zachowania się oryginału w sposób adekwatny z punktu widzenia celu rozważań*** (Niziński, 2000; Cempel, 1982; Downarowicz, 1997; Żółtowski i Niziński, 2002). Koncepcję modelowania rzeczywistości eksploatacyjnej pokazano na rysunku 2.16.



Rysunek 2.16. Koncepcja modelowania rzeczywistości eksploatacyjnej.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Niziński, 2000*)

Budową modeli zajmuje się dyscyplina naukowa nazwana identyfikacją, badająca złożone procesy w oparciu o analizę danych rzeczywistego obiektu przed zgromadzeniem informacji o jego funkcjonowaniu oraz pozyskanym doświadczeniem w trakcie eksploatacji (Żółtowski i Niziński, 2002). Wyróżnia się dwie podstawowe klasy modeli:

- modele strukturalne, które przedstawiają wybrane elementy systemu oraz zachodzące między nimi relacje. Model wykorzystywany jest w ocenie poprawności konstrukcji i przedstawiany jest w postaci rysunków złożeniowych lub schematów organizacyjnych;
- modele funkcjonalne, przedstawiające wpływ wybranych elementów i relacji na sposób funkcjonowania i sterowania systemu. Model może przybierać różną postać, często inną niż modelowany obiekt.

Mając na uwadze sposób odzwierciedlenia wybranych własności i procesów zachodzących w badanym systemie, wyróżnia się (Żółtowski i Niziński, 2002):

Modele materialne (funkcjonujące, rzeczywiste), które budowane są w celu wykonania badań z istniejących obiektów o określonym przeznaczeniu użytkowym, przy zachowaniu ich fizycznej tożsamości z oryginałem. Utworzony model fizyczny odwzorowuje ten sam proces co w rzeczywistym obiekcie, lecz przeważnie jest wykonany w pomniejszonej skali.

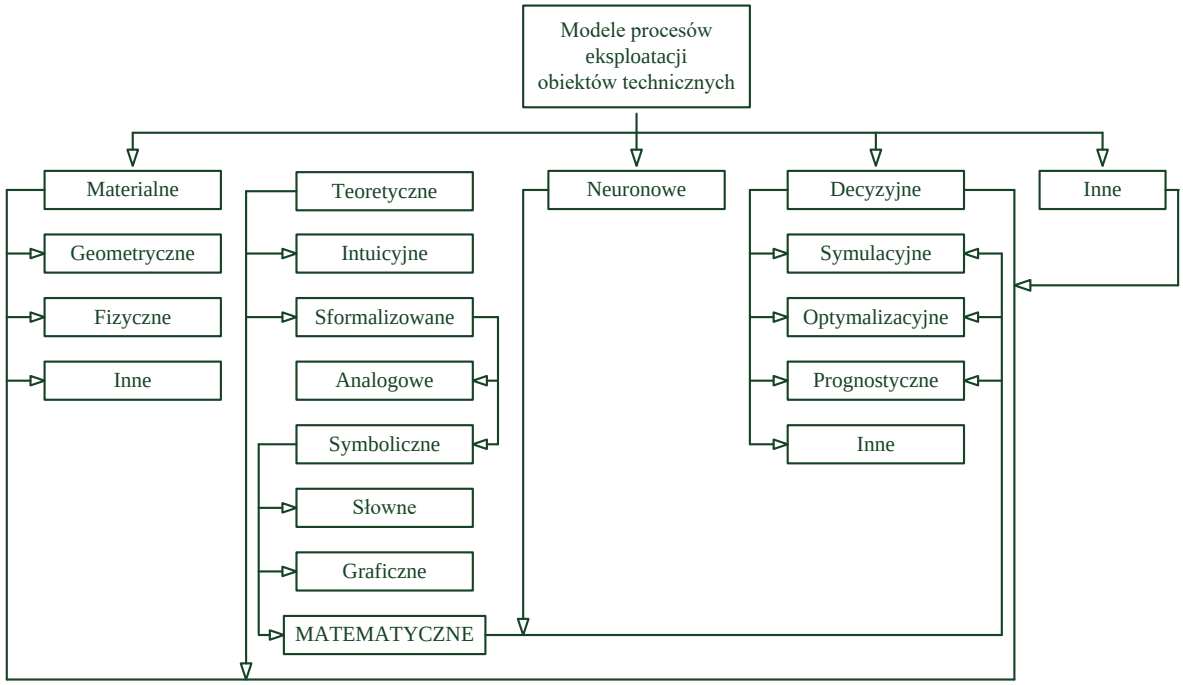
Modele intuicyjne, które nie posiadają tej samej natury fizycznej i nie są podobne pod względem fizycznym i geometrycznym. Klasa tych modeli wyraża obiekty które są zbyt skomplikowane aby stanowić przedmiot bezpośredniego poznania, lecz mogą pomóc w zbudowaniu w oparciu o nie prostszych modeli idealnych.

Modele sformalizowane mówimy o nich, gdy pojęcia występujące w budowanym modelu można wyrazić za pomocą znaków i relacji matematycznych lub logicznych. Model nie ma podobieństwa między elementami i relacjami, z którego został zbudowany, a składem

i strukturą modelowanego systemu. Modele sformalizowane nazwane są modelami matematycznymi, stanowiąc najliczniejszą grupę wśród modeli abstrakcyjnych, gdzie wykorzystuje się zapis między innymi w postaci równań różniczkowych, całkowych i probabilistycznych. Prowadzenie badań w eksploatacji z wykorzystaniem modeli matematycznych pozwala na wyjaśnienie zaistniałych własności oraz zachodzących związków i procesów dotąd niedosięgalnych lub nie poddanych analizie.

Modele energetyczne (procesor energii), które tworzy się w oparciu o przemiany energetyczne zachodzące w systemie. Modele te z uwagi na niski koszt, przy jednocześnie wszechstronnych możliwościach, są coraz częściej stosowane w naukach ścisłych oraz technice.

Metody modelowania systemu wynikają z przyjętego sposobu odwzorowania rzeczywistości. Jednym z kryteriów może być budowa modelu materialnego opartego na zasadzie prawdopodobieństwa (np. makieta przestrzenna lub odlew) lub na zasadzie podobieństwa fizycznego (np. podobieństwo mechaniczne). Innym kryterium będzie wybór modelu teoretycznego, który dzieli się na sformalizowane i intuicyjne (model analogowy), gdzie elementy systemu są reprezentowane przez inne wielkości fizyczne. W modelach symbolicznych parametry systemu są zapisywane pod postacią symboli. Najliczniejsza grupę w modelach symbolicznych tworzą modele matematyczne, które odwzorowują badany system w oparciu o analogię matematyczną, wykorzystującą równania matematyczne. Ogólną klasyfikację modeli systemów oraz procesów występujących w fazie eksploatacji pokazano na rysunku 2.17.



Rysunek 2.17. Klasyfikacja modeli procesów obiektów technicznych.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski i Niziński, 2002*)

W teorii eksploatacji obiektów i systemów technicznych, jak i w praktycznym jej zastosowaniu, wiele uwagi poświęca się problemowi modelowania. Użycie języka matematyki do opisania zachowania systemu jest najbardziej miarodajne ze względu na jego uniwersalizm i możliwość dopasowania zastosowanego zbioru symboli i relacji matematycznych oraz ścisłych zasad operowania nimi do opisu wielu zjawisk rzeczywistych.

2.4.2 Modele matematyczne procesów eksploatacji systemów technicznych

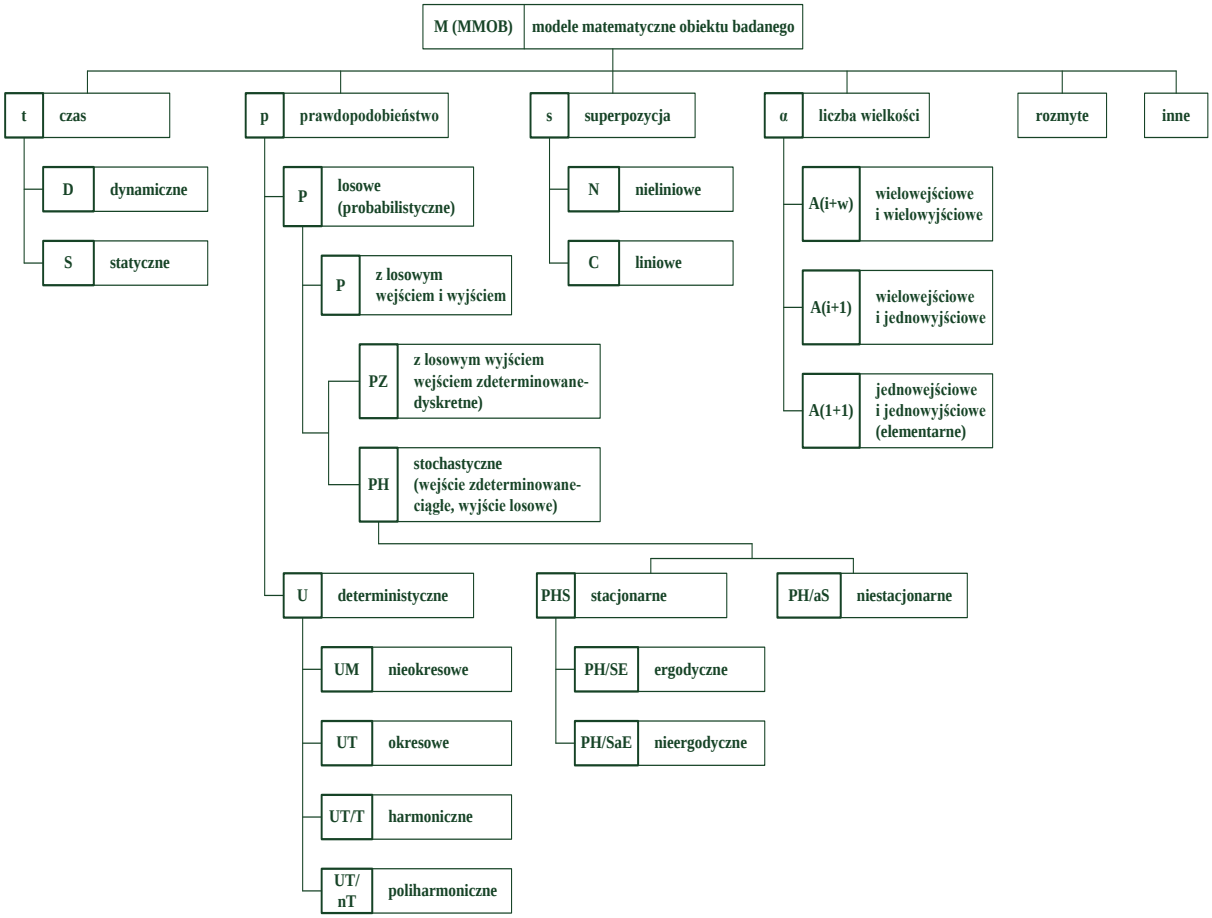
Z uwagi na przedmiot rozprawy, autor koncentruje się na budowie modelu eksploatacji systemów technicznych, który jest uzyskaniem wiarygodnego opisu matematycznego, umożliwiającego prześledzenie sposobów zachowania się obiektu w różnych warunkach. Modelem matematycznym w naukach ścisłych jest zbiór zależności o charakterze przyczynowo–skutkowym, określony za pomocą właściwych wielkości (fizycznych, chemicznych, biologicznych i ekonomicznych) (Niziński, 2000). Według Żółtowskiego (1996) wyróżnia się dwa sposoby tworzenia modelu matematycznego procesu eksploatacji systemów technicznych:

- na podstawie badań doświadczalnych (metoda eksperymentalna). Ten sposób tworzenia modelu matematycznego przyjmuje się, jeśli są nieznane podstawy teoretyczne lub zjawiska zachodzące w obiekcie badań są szczególnie złożone;
- na podstawie analizy teoretycznej zjawisk związanych z obiektem (metoda teoretyczna).

W naukach o eksploatacji technicznej istnieje wiele modeli matematycznych, w których przyjmuje się, że podstawą do klasyfikacji jest (Żółtowski i Niziński, 2002): czas *t*, prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń losowych *p*, możliwości superpozycji *s* oraz liczba obserwowanych wielkości α . Powyższe założenie pozwala na uzyskanie modeli: dynamicznych *D*, statycznych *S*, losowych *P*, deterministycznych *U*, nieliniowych *N*, liniowych *C*, a także modeli zależnych od liczby charakteryzujących je wielkości *A* wejściowych i wyjściowych. Wśród modeli losowych *P* wyróżnia się:

- model losowy (*PX*), w którym wielkości wejściowe i wyjściowe odnoszą się do wielkości losowych;
- model losowy (*PZ*), w którym wielkości wyjściowe są zdeterminowane i dyskretne, a wejściowe są wielkościami losowymi;
- model losowy stochastyczny (*PH*), gdzie wielkości wejściowe są zdeterminowane i ciągłe (np.: czas), a losowe są wielkości wyjściowe.

Na rysunku 2.18 przedstawiono wybrane modele matematyczne systemów technicznych.



Rysunek 2.18. Modele matematyczne w eksploatacji.
(Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski i Niziński, 2002)

Jak podkreślają autorzy koncepcji, powyższa klasyfikacja uwzględnia terminologie przystosowaną do badań doświadczalnych lecz równocześnie może być wykorzystana w ogólnej klasyfikacji modeli.

W modelu, gdzie wielkości sią zmienne w czasie i zależą od ich wartości w poprzednich chwilach czasu, jest modelem dynamicznym. Przeciwieństwem tych założeń jest model statyczny. Model probabilistyczny odnosi się do zmiennych, które w danej chwili pozwalają określić jedynie prawdopodobieństwo rozkładu tych zmiennych w pewnej chwili późniejszej lub pewnej chwili wcześniejszej. Model deterministyczny opisuje sytuacje, gdy znajomość wartości odpowiednich zmiennych w danej chwili pozwala określić ich wartości w chwili późniejszej lub pewnej chwili wcześniejszej.

W rozprawie, ze względu na jej założenia badawcze, szczególną uwagę poświęcono modelom stochastycznym, opisującym między innymi procesy Markowa i semi–Markowa (rozdz.

1.1.). Procesy stochastyczne umożliwiają matematyczny opis zmieniających się w czasie wielkości losowych (Grabski i Jaźwiński 2009). Taką wielkością może być czas lub liczba wykonywanych cyki obciążenia na maszynie. Do najistotniejszych własności procesu stochastycznego można zaliczyć zależność lub niezależność jego właściwości od początku przedziału czasowego. Wśród procesów stochastycznych wyróżnia się procesy stacjonarne i niestacjonarne. Procesy stacjonarne losowe to wszelkie wielowymiarowe, w których rozkłady prawdopodobieństwa zależą od wzajemnej odległości w chwilach $t_1, t_2,.., t_n$ i nie zależą od samych procesów.

Proces może być stacjonarny, jeśli właściwości statystyczne nie ulegają zmianie w przebiegu czasu. Przebieg procesu określa się jako stacjonarny, ponieważ jego wartość przeciętna i wariancja jest stała, a funkcja korelacyjna jest zależna od różnicy chwil, dla których dobrano wartości funkcji losowej. Proces stochastyczny opisuje definicja (Grabski i Jaźwiński 2009; Migawa 2013):

Proces stochastyczny lub proces losowy (Grabski i Jaźwiński, 2009) opisuje *rodzinę rzeczywistych zmiennych losowych* $\{X_t : t \in T\}$ *opisaną na wspólnej przestrzeni probabilistycznej* (Ω, F, P) *o wartościach w zbiorze* $S \subset R$. *Zbiór S opisuje przestrzeń stanów procesu stochastycznego, natomiast T odnosi się do zbioru parametrów tego procesu (np.: czasu, przebiegu, itp.).*

Z definicji procesu stochastycznego wynika, że w każdej ustalonej chwili *t*, parametr X_t jest zmienną losową, a więc funkcją określoną na przestrzeni zdarzeń elementarnych Ω o wartościach w zbiorze *S* takich, że dla każdego zbioru borelowskiego $B\{\omega : X_t(\omega) \in B\} \in F$

Dla każdego zdarzenia elementarnego ω w określonej chwili *t*, $X_t(\omega) = x(t) = x$ jest liczbą należącą do zbioru S, opisującą stan procesu. *Realizację procesu stochastycznego* określa funkcja $\{x(t) : t \in T\}$, której wartością w chwili *t* jest liczba *x(t).*

Jeśli $T = N_0 = \{0,1,2,...\}$ to $\{X_t : t \in N_0\}$ jest ciągiem, którego wyrazami są zmienne losowe $X_0, X_1, ...$, to tak rozpatrywany proces nazywa się ciągiem lub łańcuchem losowym.

W ustalonej chwili *t*, *X(t)* jest zmienną losową ciągłą lub dyskretną (skokową). Jeśli ta zmienna losowa jest skokowa to proces stochastyczny $\{X(t) : t \in T\}$ jest dyskretny w stanach, natomiast jeżeli dla ustalonego *t*, *X(t)* przedstawia zmienną losową ciągłą, to jest to proces ciągły w stanach.

Jeżeli zbiór zawiera nieprzeliczalną liczbę parametrów $T = [0, \infty]$ to zbiór stanów *S* jest procesem stochastycznym $\{X(t) : t \in T\}$ z czasem dyskretnym. W przypadku, kiedy zbiór parametrów $T \subset R$ jest przeliczalny, to określa się go jako proces losowy z czasem ciągłym lub procesem o ciągłym zbiorze parametrów.

Wyróżnia się następujące typy procesów stochastycznych (Grabski, 1978):

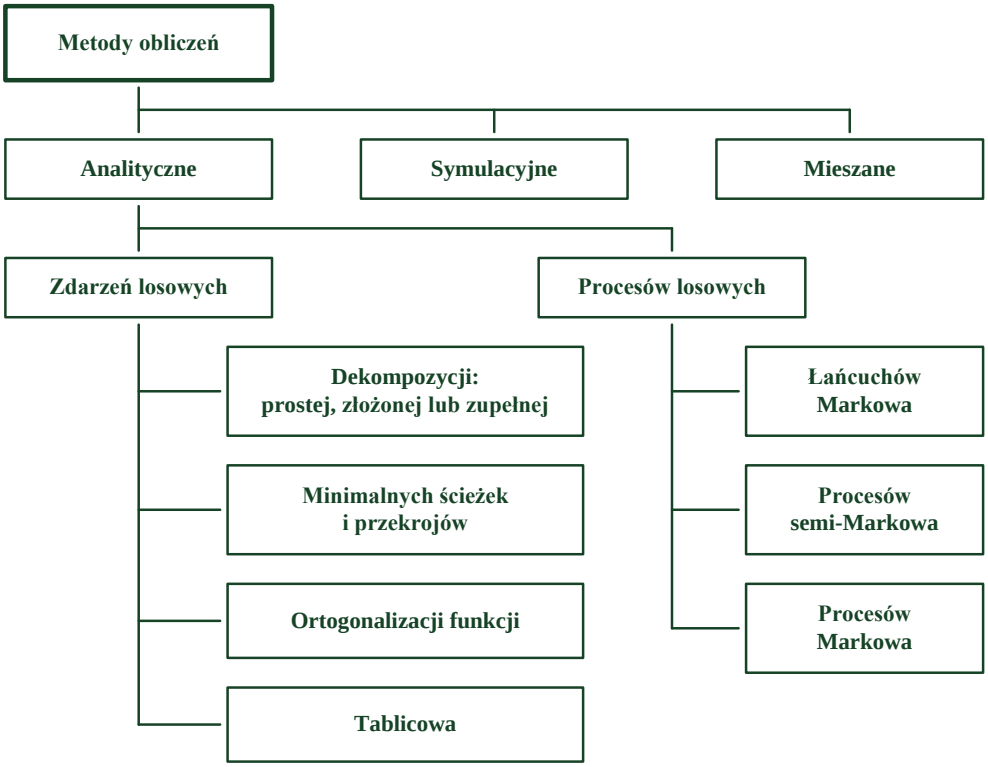
- proces dyskretny w stanach i czasie;
- proces dyskretny w stanach i ciągłym czasie;
- proces ciągły w stanach i dyskretny w czasie;
- proces ciągły w stanach i w czasie.

Jedną z klas procesów stochastycznych są procesy Markowa rozumiane jako ciąg zdarzeń losowych, których prawdopodobieństwo istnienia zależy jedynie od wyniku zdarzenia poprzedniego. W ujęciu matematycznym są podstawą do prowadzenia obliczeń na systemach o złożonej strukturze, dlatego znalazły szerokie zastosowanie w modelowaniu niezawodności systemów technicznych.

2.4.3 Procesy Markowa i semi-Markowa

Wśród systemów o złożonej strukturze niezawodnościowej, istnieje wiele metod obliczeń wskaźników niezawodności, różniących się pomiędzy sobą dokładnością oraz czasem obliczeń. Sposoby pomiaru podzielone są na trzy podstawowe grupy: analityczne, w których zdarzenia lub procesy losowe poddawane są analizie; symulacyjne, w których zdarzenia lub procesy losowe są symulowane oraz mieszane, w których wykorzystuje się oba wyżej wymienione podejścia (rys. 2.19).

Wśród metod analitycznych opartych na analizie procesów losowych do najczęściej stosowanych należą metody procesów Markowa oraz semi-Markowa. Bazują one na przyjęciu za model niezawodnościowy badanego obiektu, proces losowy spełniającego własność Markowa w którym rozkłady prawdopodobieństw czasów przebywania w stanach muszą być wykładnicze. Wyjątek stanowią obliczenia wartości asymptotycznych wskaźników niezawodności. W niektórych przypadkach istnieje również możliwość takiego przekształcenia przestrzeni stanów by niewykładnicze rozkłady prawdopodobieństw zastąpić ciągiem rozkładów wykładniczych (Paska i Marchel, 2016).



Rysunek 2.19 Podział metod obliczeń niezawodnościowych.
(*Źródło: opracowano na podstawie: Paska i Marchel, 2016*)

Proces Markowa (Grabski i Jaźwiński, 2009, Migawa 2013)

Proces stochastyczny $\{X(t): t \in T\}$ o skończonym lub przeliczalnym zbiorze stanów S nazywamy procesem Markowa, jeżeli dla dowolnych $i, j, i_0, i_1, ..., i_{n-1} \in S$ oraz $t_0, t_1, ..., t_n, t_{n+1} \in R_+$ takich, że $0 \le t_o < t_1 < ...t_n < t_{n+1}$ zachodzi związek:

$$\begin{aligned} &P\{X(t_{n+1}) = j \,|\, X(t_n) = i, X(t_{n-1}) = i_{n-1}, ..., X(t_1) \\ &= i_1, X(t_0) = i_0\} = P\{X(t_{n+1}) = j \,|\, X(t_n) = i\} \end{aligned} \tag{2.36}$$

to chwile $t_0, t_1, ..., t_n, t_{n-1} \in R_+$, należy interpretować jako przeszłość, t_n jako teraźniejszość, a t_{n+1} jako najbliższą przyszłość. Proces ten nazywany jest procesem Markowa „bez pamięci". Bezpośredni wpływ ma tylko stan, w którym znajduje się proces w momencie t_{n+1}. Oznacza to, że rozkład warunkowy „przyszłych" stanów nie zależy od „przeszłości", kiedy znany jest „teraźniejszy" stan procesu.

Jeżeli zbiór parametrów T jest identyczny ze zbiorem liczb naturalnych, tzn. $T = N_0 = \{0, 1, 2, ...\}$, proces Markowa jest ciągiem zmiennych losowych nazywanych łańcuchem Markowa. Jeżeli $T = R_+$, to nazywany jest procesem Markowa z „czasem ciągłym".

Proces Markowa z czasem ciągłym (Grabski i Jaźwiński, 2009)

Proces Markowa z czasem ciągłym jest procesem jednorodnym, jeżeli dla dowolnych $i, j \in S$ oraz $t_n, t_{n+1} \in R_+$ takich, ze $0 \le t_n < t_{n+1}$ zachodzi związek:

$$P(X_{t_{n+1}} = j \,|\, X(t_n) = i) = P(X(t_{n+1-t_n} = j \,|\, X_0 = i) = p_{ij}(t_{n+1} - t_n) \tag{2.37}$$

Przyjmując, że $t = t_{n+1} - t_n$ to otrzymuje się liczbę, która nazywana jest prawdopodobieństwem przejścia ze stanu *i* do stanu *j* po czasie *t*:

$$p_{ij}(t) = P(X_t = j \,|\, X_0 = i),\ i, j \in S,\ t \ge 0 \tag{2.38}$$

Ze wzoru 2.38 wynikają następujące własności prawdopodobieństw przejścia dla jednorodnych procesów Markowa o dyskretnej przestrzeni stanów (Grabski i Jaźwiński, 2009; Migawa 2013):

- dla każdych $i, j \in S$, $p_{ij}(t) \ge 0$, $t \ge 0$;
- dla każdego $i \in S$, $\sum_{i \in S} p_{ij}(t) = 1$, $t \ge 0$;
- dla każdych $i, j \in S$, $p_{ij}(t+s) = \sum_{k \in S} p_{ik}(t) p_{kj}(s)$, $t \ge 0$, $s \ge 0$;
- dla każdych $i, j \in S$, $\lim_{t \to 0} p_{ij}(t) = p_{ij}(0) = \delta_{ij}$, gdzie δ_{ij} (delta Kroneckera) – jest dwuargumentową funkcją przyjmującą wartości *1* dla *i=j* i *0* dla $i \ne j$.

W procesach Markowa istotną role odgrywa intensywność zmian stanu procesu. Dla dowolnego jednorodnego procesu Markowa o prawdopodobieństwach przejść $p_{ij}(t)$, gdzie $i, j \in S$, zawsze istnieją granice (Grabski, 2002):

$$\lambda_i = \lim_{h \to 0^+} \frac{1 - p_{ij}(h)}{h} \le \infty, i \in S \tag{2.39}$$

oraz istnieją skończone granice:

$$\lambda_{ij} = \lim_{h \to 0} \frac{1 - p_{ij}(h)}{h} = p'_{ij}(0) < \infty,\ i, j \in S,\ i \ne j \tag{2.40}$$

Przyjmując $\lambda_{ii} = -\lambda_i$ wielkości λ_{ij}, gdzie $i, j \in S$ tworzą macierz funkcyjną nazwaną *macierzą intensywności przejścia* lub *macierzą intensywności zmian stanów* jednorodnego procesu Markowa (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\Lambda = \left[\lambda_{ij} : i, j \in S \right] \tag{2.41}$$

o następujących właściwościach:

- dla każdych $i, j \in S$, $\lambda_{ij}(t) \geq 0, i \neq j$;
- dla każdego $i \in S$, $\lambda_{ii} \leq 0$;
- dla każdych $i, j \in S$, $\sum_{j \in S} \lambda_{ij} = 0$;
- dla każdych $i, j \in S$, $\lambda_{ii} = -\sum_{j \in S} \lambda_{ij}$, $i \neq j$.

Dla dowolnego jednorodnego procesu Markowa (Grabski i Jaźwiński, 2009) o skończonym zbiorze stanów *S* oraz macierzy intensywności $\Lambda = \left[\lambda_{ij} : i, j \in S \right]$, w przypadku gdy istnieje liczba $t_m \in R_+$, gdzie $m = \{0,1,2,...\}$, a macierz $P = \left[p_{ij}(t_m) : i, j \in S \right]$ posiada co najmniej jedną kolumnę składającą się z liczb dodatnich, to jeśli istnieją granice:

$$\lim_{t \to \infty} p_j(t) = p_j, \ j \in S \tag{2.42}$$

to stanowią graniczny rozkład prawdopodobieństw stanów jednorodnego procesu Markowa:

$$\sum_{i \in S} p_i \lambda_{ij} = 0, \ j \in S, \quad \sum_{j \in S} p_j = 1 \tag{2.43}$$

Łańcuchy Markowa

Łańcuchy Markowa należą do matematycznych modeli procesów losowych, które ewoluując w czasie, pamiętając najbliższą przeszłość. W przypadku ciągu losowego nazwanego jednorodnym łańcuchem Markowa o skończonym lub przeliczalnym zbiorze stanów, rozkłady są niezmienne względem czasu.

Łańcuch Markowa (Grabski i Jaźwiński, 2009; Migawa 2013)

Niech *S* będzie zbiorem dyskretnym, czyli zbiorem skończonym lub o przeliczalnym zbiorze stanów i niech posiada parametry oznaczające zbiór liczb naturalnych $T = N = \{1,2,..\}$ a także $N_0 = \{0,1,2,..\}$ oznaczający zbiór liczb całkowitych nieujemnych to ciąg zmiennych losowych $\{X_n : n \in N_0\}$, którego wyrazy przyjmują wartości z dyskretnego zbioru stanów *S*, jest jednorodnym łańcuchem Markowa o rozkładzie początkowym:

$$P(X_0 = i) = p_i, \ i \in S \tag{2.44}$$

w przypadku gdy dla dowolnego $n \in N$ oraz dowolnych stanów $i, j, i_0, ..., i_{n-1} \in S$, spełnione jest:

$$P\left(X_{n+1} = j \middle| X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, ..., X_1 = i_1, X_0 = i_0\right) = P(X_{n+1} = j \middle| X_n = i) \tag{2.45}$$

a także:

$$P\left(X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, ..., X_1 = i_1, X_0 = i_0\right) > 0 \tag{2.46}$$

Jeśli przyjąć, że $n \in N_0$ będą chwilami lub momentami to łańcuch Markowa w stanach procesu *n+1* zależy wyłącznie od chwili *n*, a nie zależy od stanów w chwilach wcześniejszych. Prawdopodobieństwo warunkowe (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$P\left(X_{n+1} = j \middle| X_n = i\right) = p_{ij} \tag{2.47}$$

jest prawdopodobieństwem przejścia ze stanu $i \in S$ w chwili *n* do stanu $j \in S$ w chwili *n+1*. Prawdopodobieństwo nie zależy od *n*. Liczbowa macierz kwadratowa ma postać:

$$P\left[p_{ij} : i, j \in S\right] \tag{2.48}$$

Kwadratowa macierz liczbowa opisuje prawdopodobieństwo przejść jednorodnego łańcucha Markowa. Macierz jest macierzą stochastyczną co oznacza, że nieujemne elementy każdego przejścia sumują się do jedności po spełnieniu następujących warunków (Grabski i Jaźwiński, 2009; Migawa, 2013):

$$p_{ij} \geq 0 \text{ dla } i, j \in S \text{ oraz } \sum_{j \in S} p_{ij} = 1 \text{ dla wszystkich } i \in S \tag{2.49}$$

Jednowierszowa macierz liczbowa wygląda następująco:

$$p = \left[p_i : i \in S\right] \tag{2.50}$$

stanowiąc rozkład początkowy jednorodnego łańcucha Markowa, który spełnia następujące warunki:

$$p_i \geq 0 \text{ dla } i \in S \text{ oraz } \sum_{i \in S} p_i = 1 \tag{2.51}$$

Rozkład stacjonarny i rozkład graniczny

Znaczącą rolę w badaniu łańcuchów Markowa odgrywają charakterystyki graniczne, w szczególności granice prawdopodobieństw $p_i(n)$ przy $n \to \infty$, opisujące prawdopodobieństwo zachowania się procesu po długim czasie obserwacji.

Rozkład stacjonarny jednorodnego łańcucha Markowa

Rozkładem stacjonarnym jednorodnego łańcucha Markowa $\{X_n : n \in N_0\}$ jest macierz jednowierszowa $\pi = [\pi_i : i \in S]$ oraz macierz prawdopodobieństwa przejścia $P = [p_{ij} : i, j \in S]$ spełniająca układ równań liniowych (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\sum_{i \in S} \pi_i p_{ij} = \pi_j, \quad j \in S \quad \text{oraz} \quad \sum_{i \in S} \pi_i = 1 \tag{2.52}$$

Rozkład stacjonarny π jest rozkładem prawdopodobieństwa w przestrzeni stanów *S*, spełniających układ równań liniowych o współczynnikach spełniających wymagane warunki dla macierzy prawdopodobieństw przejścia *P*, gdzie ***1*** jest macierzą jednokolumnową. Jej elementami są same jedynki a liczba elementów równa się liczbie elementów zbioru *S (*Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\pi P = \pi, \ \pi 1 = [1] \tag{2.53}$$

Oznacza to, że łańcuch o dyskretnym zbiorze stanów *S* będzie miał rozkład stacjonarny wtedy i tylko wtedy, kiedy *S* będzie zawierało jedną klasę stanów istotnych, powracających i dodatnich.

Jeśli dla dowolnego łańcucha Markowa istnieje granica ciągu $\{p_{ij}(n) : n \in N\}$, to taki łańcuch Markowa $\{X_n : n \in N_0\}$ zawiera jedną klasę stanów powracających dodatnich jego granice średniej arytmetycznej pierwszych *n* sum częściowych szeregu, $i, j \in S$ nie zależą od $i \in S$ oraz:

$$q_{ij} = \pi_j, \in S \tag{2.54}$$

tworząc *rozkład stacjonarny*.

Proces semi–Markowa (SM) w przeciwieństwie do procesu Markowa (czasy przebywania w stanach są zmiennymi losowymi o rozkładzie wykładniczym), opisuje czasy przebywania w stanach za pomocą rozkładów dowolnych.

Proces semi–Markowa często buduje się w oparciu o markowski proces odnowy, który należy do szczególnego markowskiego procesu, opisanego poprzez dwuwymiarowy łańcuch

Markowa. W celu zdefiniowania markowskiego procesu odnowy, sprecyzowano pojęcie markowskiego procesu odnowy.

Markowski proces odnowy

Niech N i N_0 opisują zbiór liczb naturalnych oraz rodzinę liczb całkowitych nieujemnych. Niech także S opisuje zbiór skończony lub przeliczalny w którym R_+ oznacza zbiór liczb rzeczywistych nieujemnych (Grabski i Jaźwiński, 2009).

Przestrzeń probabilistyczna (Ω, F, P), na której określony jest dwuwymiarowy ciąg zmiennych losowych $\{(\xi_{n,}\vartheta_n) : n \in N_0\}$ taki, że $\xi_n : \Omega \to S$, określa następstwo stanów w realizacji procesu semi–Markowa oraz $\vartheta_n : \Omega \to R_+$ opisuje czasy pozostawania w stanach procesu semi–markowskiego mających dowolne rozkłady prawdopodobieństwa.

Dwuwymiarowy ciąg zmiennych losowych $\{(\xi_{n,}\vartheta_n) : n \in N_0\}$ jest *markowskim procesem odnowy* (Grabski i Jaźwiński, 2009). Proces ten, określony jest poprzez jego rozkład początkowy p i jądro odnowy $Q(t)$, gdzie $t \in R_+$, jeśli spełnione są następujące warunki:

1. Dla wszystkich $n \in N_0$, $j \in S$, $t \in N_+$:

$$P(\xi_{n+1} = j, \vartheta_{n+1} \le t \,|\, \xi_n = i, \vartheta_n, ..., |\xi_0, \vartheta_0) = P\{\xi_{n+1} = j, \vartheta_{n+1} \le t \,|\, \xi_n\} \tag{2.55}$$

z prawdopodobieństwem P równym *1*.

2. Dla dowolnych stanów $i, j \in S$ oraz $t \ge 0$, oznaczają prawdopodobieństwa tego, że proces może przebywać w stanie $i \in S$ w czasie nie dłuższym niż t a po tym czasie przejdzie w stan procesu $j \in S$. Macierz funkcyjną określoną jako *jądro odnowy* można opisać jako:

$$Q(t) = \left[Q_{ij}(t) : i, j \in S \right] \tag{2.55}$$

gdzie:

$$Q_{ij}(t) = P(\xi_{n+1} = j, \vartheta_{n+1} \le t \,|\, \xi_n = i) \tag{2.56}$$

Rozkład początkowy *markowskiego procesu odnowy* opisuje wektor $p = \left[p_i : i \in S \right]$ będący rozkładem prawdopodobieństwa na zbiorze stanów S, gdzie $p_i = P\{\xi_0 = i\}$. Jądro odnowy spełnia następujące warunki (Grabski i Jaźwiński, 2009; Migawa, 2013):

- dla wszystkich par $(i, j) \in S \; x \; S$ funkcje $Q_{ij}(t)$ oraz $t \geq 0$ są funkcjami niemalejącymi i prawostronnie ciągłymi;
- dla wszystkich par $(i, j) \in S$, $Q_{ij}(0) = 0$ oraz $Q_{ij}(t) \leq 1$ dla $t \geq 0$;
- dla wszystkich stanów $i \in S$, $\lim_{t \to \infty} \sum_{j \in S} Q_{ij}(t) = 1$.

Z wyprowadzenia równań (Grabski i Jaźwiński, 2009, s.87), jądro odnowy $Q(t)$ będzie macierzą stochastyczną oraz, że dla każdego $i \in S$ funkcja

$$G_i(t) = \sum_{j \in S} Q_{ij}(t) \tag{2.57}$$

stanowi dystrybuantę rozkładu prawdopodobieństwa skoncentrowanego w zbiorze liczb R_+.

Z definicji markowskiego procesu odnowy wynika również, że należy on do szczególnego przypadku *dwuwymiarowego łańcucha Markowa*, w którym prawdopodobieństwa przejścia zależą wyłącznie od dyskretnej współrzędnej.

***Proces semi–Markowa* (SM)**

Proces losowy $\{X(t) : t \in R_+\}$ określony wzorem (Grabski, 2002):

$$X(t) = \xi_{N(t)} \tag{2.58}$$

nazywany jest *procesem semi–Markowa* (SM) o przestrzeni stanów S i zbierze parametrów R_+ generowany przez markowski proces odnowy $\{(\xi_n, \vartheta_n) : n \in N_0\}$ o rozkładzie początkowym *p* i jądrze *Q(t),* $t \in R_+$.

Definicja procesu semi–Markowa

Proces SM (Grabski i Jaźwiński, 2009) *jest procesem stochastycznym o dyskretnej przestrzeni stanów S, z „ciągłym czasem" $t \in T = R_+$. Proces jest zdefiniowany jeżeli zostało określone jego jądro oraz rozkład początkowy.*

W oparciu następującą definicje procesu semi–markowskiego wynika, że poszczególne realizacje procesu są funkcjami przyjmującymi stałe wartości w przedziałach, prawostronnie ciągłymi o dowolnym rozkładzie prawdopodobieństwa τ_n, τ_{n+1}:

$$X(t) = \xi_n \text{ dla } \tau_n \leq t < \tau_{n+1}, \; n \in N_0 \tag{2.59}$$

Z definicji SM oraz markowskiego procesu odnowy (Grabski i Jaźwiński, 2009) wynika również, że bieżący stan procesu oraz czas jego trwania zależy wyłącznie od stanu poprzedniego i nie zależy od wcześniejszych stanów oraz czasów ich trwania. Można również przyjąć,

że SM wynika następujący związek $X(\tau_n)=\xi_n$ dla $n\in N_0$. Oznacza to, że ciąg losowy $X(\tau_n)=\xi_n:\ n\in N_0$ jest *jednorodnym łańcuchem Markowa* o zbiorze stanów *S*, określonym przez rozkład początkowy $p=\left[p_i : i\in S\right]$ i macierz prawdopodobieństw przejścia $P=\left[p_{ij} : i,j\in S\right]$, gdzie $p_{ij}=\lim_{t\to\infty} Q_{ij}(t)$.

Ciąg losowy $\left\{X(\tau_n) : n\in N_0\right\}$ nazywany jest *włożonym w proces semi–Markowa łańcuchem Markowa*. Opisuje on następstwo stanów procesu semi–Markowa $\left\{X(t) : t\geq 0\right\}$, który będzie procesem regularnym jeśli w każdym przedziale [*0,t*] liczba zmian jego stanów jest skończona z prawdopodobieństwem równym ***1***. Funkcja wygląda następująco (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$F_{ij}(t)=P(\tau_{n+1}-\tau_n\leq t\,|\,X(\tau_n)=i, X(\tau_{n+1})=j)=\frac{Q_{ij}(t)}{p_{ij}} \tag{2.60}$$

opisując dystrybuantę rozkładu zmiennej losowej T_{ij} oznaczającą warunkowy czas trwania stanu $i\in S$, po którym nastąpi stan $j\in S$. Ze wzoru funkcji wynika następująca równość (Grabski, 2002; Migawa, 2013):

$$Q_{ij}(t)=p_{ij}F_{ij}(t) : i,j\in S \tag{2.61}$$

Z powyższego wzoru (2.61.) wynika, że proces semi–Markowa można określić poprzez:

- rozkład początkowy $p=\left[p_i : i\in S\right]$;
- macierz prawdopodobieństw przejścia włożonego łańcucha Markowa $P=\left[p_{ij} : i,j\in S\right]$;
- macierz dystrybuant warunkowych czasów trwania stanów $F(t)=\left[F_{ij}(t) : i,j\in S\right]$.

Funkcja (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$\sum_{j\in S}\pi_j=1 \tag{2.62}$$

jest dystrybuantą zmiennej losowej T_{ij} opisującej czas pozostawania w stanie *i* jeśli następnym stanem będzie stan *j*.

Wybrane własności procesu semi–Markowa

Budując model oparty o proces SM należy określić rozkład początkowy oraz jądro procesu. Wielkości te umożliwiają zawrzeć pełną informację o powyższym procesie i pozwalają

obliczyć wiele istotnych własności w modelach niezawodnościowych. Jedną z ważnych charakterystyk procesu semi–markowskiego są prawdopodobieństwa przejść między stanami procesu, opisywane jako *prawdopodobieństwo warunkowe*.

Prawdopodobieństwo warunkowe (Grabski, 2002):

$$P_{ij}(t) = P(X(t) = i \,|\, X(0) = i),\ j \in S \tag{2.63}$$

nazywamy prawdopodobieństwem przejścia ze stanu i w chwili 0 do stanu j w chwili t.

Z równania Fellera (1964) wynika, że jeżeli regularny proces semi–markowski $\{X(t) : t \in R_+\}$ posiada dyskretny zbiór stanów *S*, gdzie $i, j \in S$, $i \to j$ lub $j \to i$, to prawdopodobieństwo przejścia $P_{ij}(t)$, $i, j \in S$ będzie jedynym rozwiązaniem układu równań całkowych. Układ ten można rozwiązać za pomocą przekształcenia Laplace'a-Stieltjesa, który po rozwiązaniu przyjmie następującą postać (Grabski i Jaźwiński, 2009): :

$$\tilde{p}_{ij}(s) = \int_0^\infty e^{-st} dP_{ij}(t) \tag{2.64}$$

$$\tilde{q}_{ik}(s) = \int_0^\infty e^{-st} dQ_{ik}(t) \tag{2.65}$$

$$\tilde{g}_i(s) = \int_0^\infty e^{-st} dG_i(t) \tag{2.66}$$

Często w modelu $t \to \infty$ rozkład jednowymiarowy procesu $P_{ij}(t)$ stabilizuje się po pewnym czasie, ponieważ jego prawdopodobieństwa stanów w chwili *t* w odległej chwili *0* zmierzają do stałych wartości. Wtedy można prawdopodobieństwo przebywania w stanie zastąpić prawdopodobieństwami granicznymi za pomocą wyrażeń (Grabski, 2002):

$$P_j = \lim_{x \to \infty} P_j(t) = \lim_{x \to \infty} P(X(t) = j),\ j \in S \tag{2.67}$$

$$P_{ij} = \lim_{x \to \infty} P_{ij}(t) = \lim_{x \to \infty} P(X(t) = j \,|\, X(0) = i),\ i, j \in S \tag{2.68}$$

W pracach (Grabski, 2002; Migawa, 2013; Grabski i Jaźwiński, 2009; Girtler i Ślęzak, 2013) zawarto twierdzenia oraz warunki istnienia prawdopodobieństw granicznych dla $t \to \infty$. Na tej podstawie można sformułować *twierdzenie graniczne* dla prawdopodobieństw przejścia:

Jeżeli włożony łańcuch Markowa $\{X(t) : t \geq 0\}$ w proces semi–Markowa $\{X(t) : t \in R_+\}$ o dyskretnym zbiorze stanów *S* i jądrze typu ciągłego $Q(t) = [Q_{ij}(t) : i, j \in S]$ zawiera jedną klasę *C* stanów powracających dodatnich takich, że dla każdego stanu $i \in S$, $j \in C$, $f_{ij} = 1$,

a także wartości oczekiwane $E(T_i) = \int_0^\infty [1 - G_i(t)]dt$, $i \in S$ to istnieją granice przy $t \to \infty$ praw-

dopodobieństw przejścia $P_{ij}(t)$, gdzie $i, j \in S$ oraz istnieją granice przy $t \to \infty$ prawdopodobieństw stanów $P_j(t)$, $j \in S$ to zgodnie ze wzorem (Grabski i Jaźwiński, 2009):

$$P_{ij} = \lim_{t\to\infty} P_{ij}(t) = P_j = \lim_{t\to\infty} P_j(t) = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{i\in S} \pi_i E(T_i)} \tag{2.69}$$

gdzie prawdopodobieństwa π_i, $i \in S$ stanowią *rozkład stacjonarny włożonego łańcucha Markowa* spełniającego układ równań liniowych:

$$\sum_{i\in S} \pi_i p_{ij} = \pi_j, \; j \in S, \; \sum_{j\in S} \pi_j = 1 \tag{2.70}$$

Z przytoczonych twierdzeń wynika, że przy pewnych założeniach graniczny rozkład prawdopodobieństw procesu semi–Markowa, można wyznaczyć na podstawie rozkładu stacjonarnego włożonego łańcucha Markowa i wartości oczekiwanych czasów trwania stanów procesu.

Podsumowując, wybrane zagadnienia dotyczące procesów stochastycznych przeznaczonych do opisu zmian procesów eksploatacji systemów technicznych, można wysunąć następujące wnioski (Żółtowski i Niziński, 2002):

- czas eksploatacji systemu technicznego jest zmienną losową, którą można scharakteryzować poprzez: dystrybuantę, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa, funkcje niezawodności i zawodności oraz przy pomocy funkcji intensywności uszkodzeń;
- proces eksploatacji można wyznaczyć przy pomocy łańcuchów Markowa, cechującego tzw. „brak pamięci”;
- pełniejszą informację o zachodzącym procesie można uzyskać stosując procesy semi–Markowa, ponieważ czasy przebywania procesu w stanach mogą mieć rozkład dowolny szczególnie w przypadku struktury systemu innej niż szeregowa.

Wobec teoretycznej analizy problemu badawczego, autor rozprawy uznaje, że możliwe jest zbudowanie semi–markowskiego modelu niezawodności centrum obróbczego przeznaczonego do seryjnej produkcji mebli (rozdział 4). W dalszej części dysertacji opisano obszar i przedmiot badań, a także prowadzone wstępne badania, które pozwoliły wyznaczyć istotę zagadnienia (rozdz.3).

3 BADANIA WSTĘPNE EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACJI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PRZEDSIĘBIORSTWACH BRANŻY MEBLARSKIEJ

3.1 Identyfikacja przedsiębiorstwa

W niniejszym rozdziale opisano obszar skoncentrowany na masowej produkcji mebli. Za przedmiot badań wybrano złożony system techniczny, przedstawiono metody ogólnego pomiaru przez przedsiębiorstwa przestojów w dwóch zakładach produkcyjnych dla czterech centrów obróbczych, wskazano koszty zatrzymania jednej minuty w wyniku awarii centrum obróbczego oraz opisano autorską koncepcje wykorzystania zapisów informacji wykonywanych przez operatorów obsługujących linię produkcyjną.

W celu prowadzenia dalszych rozważań badawczych, skoncentrowano się na dwóch zakładach produkujących meble w Polsce, należących do holenderskiego koncernu. Realizowany proces technologiczny obejmuje obszar od tartaku, przez produkcję płyty klejonej, obróbkę mechaniczną i lakierniczą, pakowania i składowania wyrobu gotowego w magazynach.

Poddane badaniu zakłady produkcyjne należą do jednego producenta, której jednostki ulokowane są w Polsce, Rosji, Słowacji, Stanach Zjednoczonych oraz Chinach. Najliczniejsza grupa zakładów produkujących meble znajduje się w Polsce. Kapitał zakładowy grupy w kraju szacuje się na ok 2,5 biliona złotych, a zatrudnienie wynosi około 11 tys. pracowników (dane ze strony producenta).

Polskie przedsiębiorstwa produkujące meble, należące do światowego lidera w zakresie: innowacyjności produkcji, technologii oraz rodzaju produkowanego materiału, są podzielone na trzy grupy:

- grupa: lite drewno – tartaki, producenci płyty klejonej i mebli z drewna litego (10 zakładów produkcyjnych);
- grupa: materiały drewnopochodne – produkcja mebli na bazie płyt drewnopochodnych (4 zakłady produkcyjne);
- grupa odpowiedzialna za zakupy – rozproszona jednostka organizacyjna, zrzeszająca specjalistów od rynku materiałów niezbędnych dla zapewnienia ciągłości produkcji w poszczególnych jednostkach produkcyjnych.

Polska grupa należąca do koncernu w swoich strukturach posiada dwa oddziały ds. rozwoju produktów. Pierwszy oddział odpowiada za wdrożenia wyrobów z drewna litego, natomiast druga jednostka za implementacje produktów z materiałów drewnopochodnych. Każda z

jednostek posiada bardzo dobrze wyposażoną prototypownię z grupą wykwalifikowanych stolarzy, laboratoria do testowania wytrzymałości konstrukcji, komory klimatyczne do testowania odporności produktu, grupę inżynierów produktu odpowiedzialnych za konstrukcje, projektowanie opakowania, wymagania jakościowe.

Przedsiębiorstwa produkujące meble szkieletowe i skrzyniowe z drewna litego oraz klejonej płyty sosnowej wytwarzają wyroby w systemie czterozmianowym w nowoczesnych halach produkcyjnych o łącznej powierzchni 35 000 m^2. Przykład nowoczesnej hali produkcyjnej pokazano na rys. 3.1.



Rysunek 3.1. Hala produkcyjna zakładu produkującego meble.
(*Źródło: fotografia z dokumentów przedsiębiorstwa*)

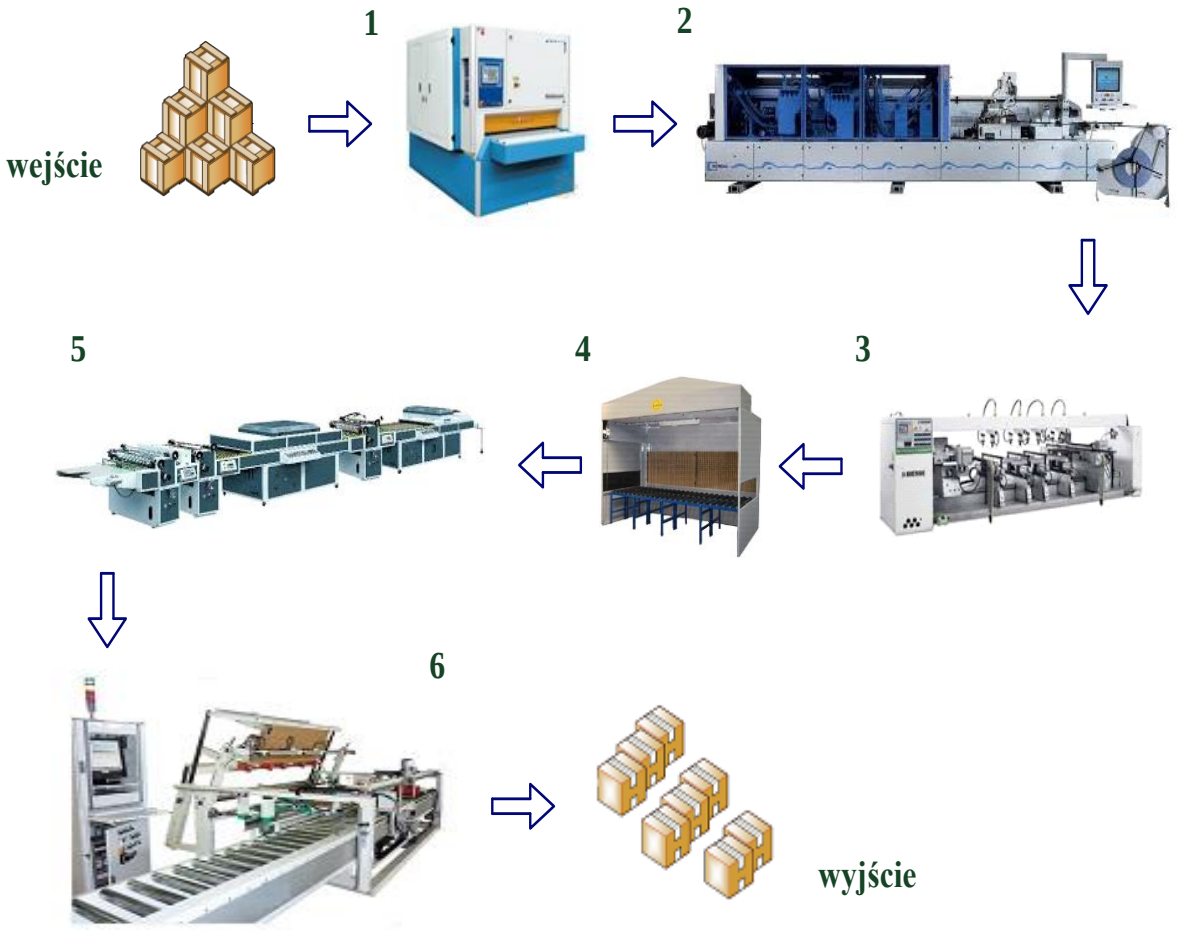
Wszystkie fabryki produkujące seryjnie meble w swoim wyglądzie są do siebie bardzo zbliżone. Wynika to z faktu, że na rynku nadal są czołowi producenci maszyn, którzy w oparciu o wieloletnie doświadczenie są liderami w zakresie innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Dostępna wiedza producenta z zakresu specyfiki procesu wytwórczego produkowanych wyrobów, wymusza tak obrany układ połączenia maszyn i urządzeń.

3.2 Charakterystyka badanego systemu technicznego

3.2.1 Proces wytwarzania mebli skrzyniowych

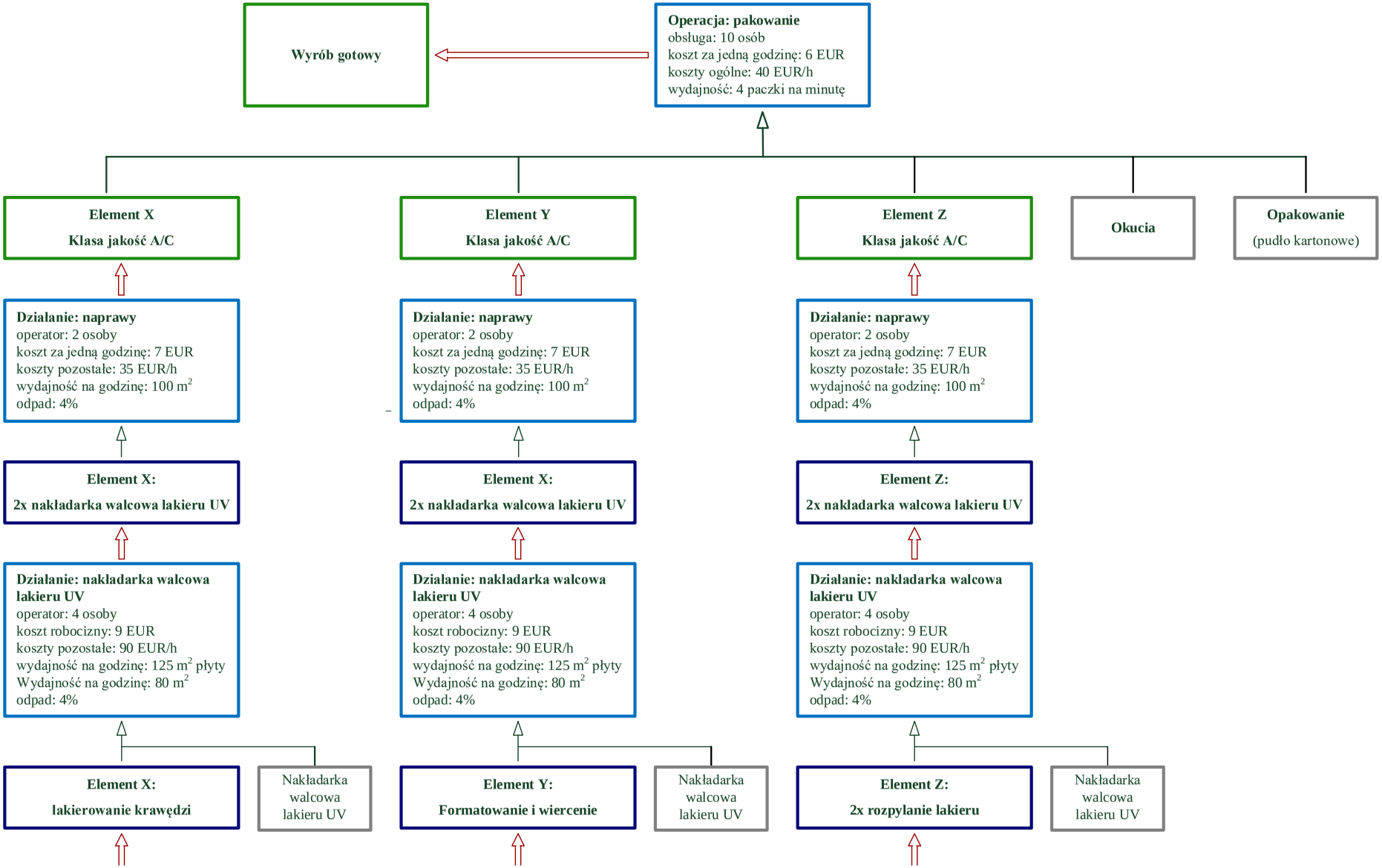
Proces technologiczny realizowany w przedsiębiorstwach dotyczy produkcji elementów z płyty klejonej (np.: wieniec górny, wieniec dolny, płycina boku, czoła szuflad, tyły i boczki, drzwi, łączyny). Część komponentów (np.: nogi, łączyny, ramiaki poziome boku, boczki szuflad), są dostarczane przez inne fabryki należące do producenta lub przez firmy ze-

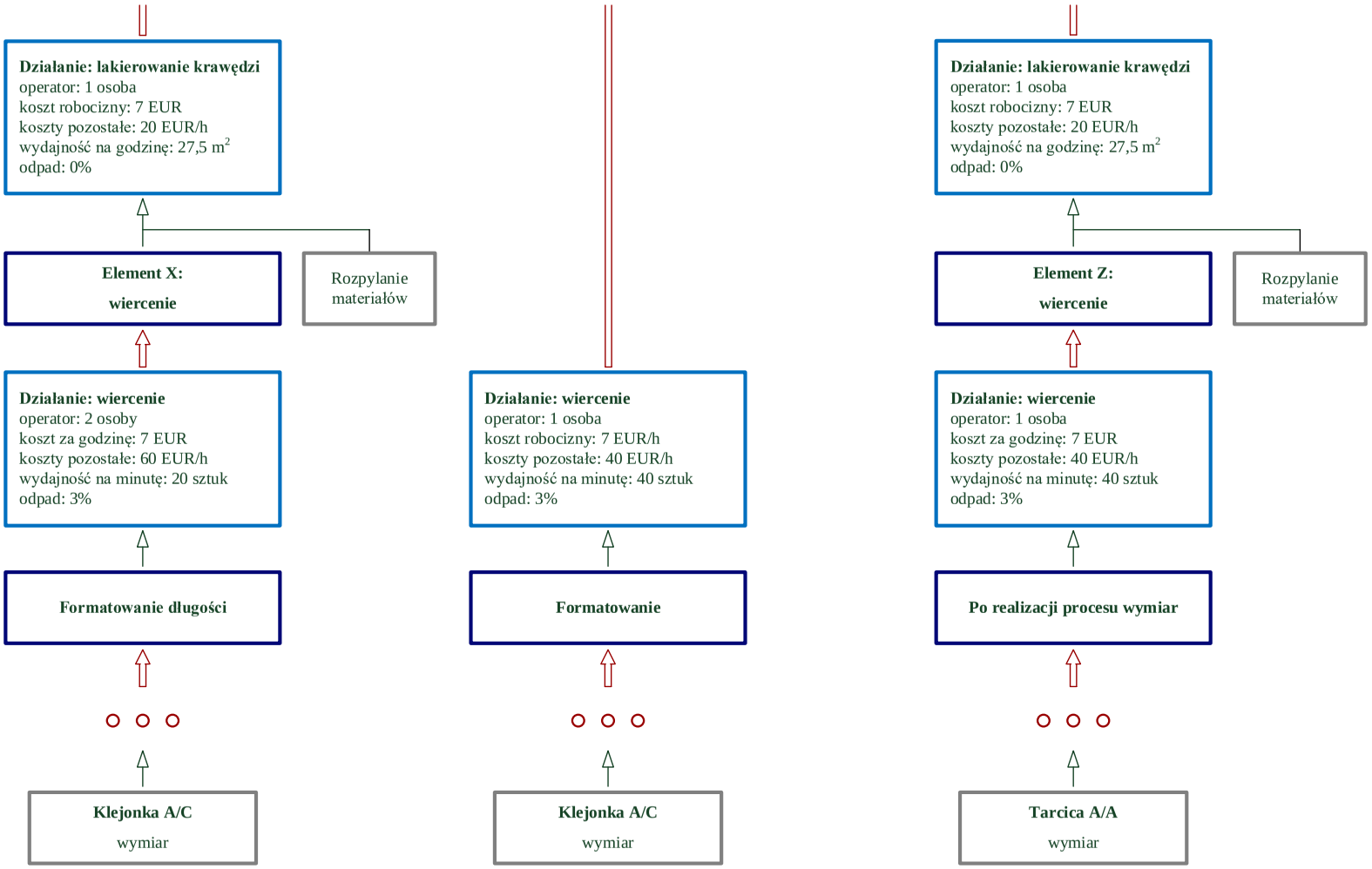
wnętrzne. Wszystkie elementy z wyłączeniem boczków i tyłów szuflad podlegają obróbce lakierniczej. Elementy boku: noga przednia, noga tylna, ramiak poziomy dolny, ramiak poziomy górny, płycina boku, są dodatkowo sklejane razem na ściskach automatycznych. Powyższe elementy pakowane są w pudła kartonowe z wypełnieniami kartonowymi, z okuciami, papierem przekładkowym oraz instrukcją montażu. Następnie gotowe paczki są układane na paletach kartonowych, spinane taśmami i owijane folią (Szwedzka, et al., 2014). Przykład maszyn biorących udział w procesie produkcji mebli przedstawiono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2. Przebieg procesu produkcji mebli skrzyniowych (wejście:
1. szlifierka, 2. frezarko–czopiarka, 3. wiertarka przelotowa, 4. automatyczne pistolety natryskowe, 5. linia UV, 6. linia pakowania : wyjście).
(*Źródło: opracowanie własne: na podstawie materiałów przedsiębiorstwa*)

Zakład produkcyjny szczegółowo planuje przebieg procesu wytwórczego, wykorzystując oprogramowanie typu ERP (ang. Enterprise Resource Planning), które jest traktowane jako zintegrowane zarządzanie przedsiębiorstwem (Lewandowski, i in., 2014). Przykład przebiegu procesu w omawianych przedsiębiorstwach produkcyjnych zilustrowano na rysunku 3.3.


Wyrób gotowy
Operacja: pakowanie
obsługa: 10 osób
koszt za jedną godzinę: 6 EUR
koszty ogólne: 40 EUR/h
wydajność: 4 paczki na minutę
Element X
Klasa jakość A/C
Element Y
Klasa jakość A/C
Element Z
Klasa jakość A/C
Okucia
Opakowanie
(pudło kartonowe)
Działanie: naprawy
operator: 2 osoby
koszt za jedną godzinę: 7 EUR
koszty pozostałe: 35 EUR/h
wydajność na godzinę: 100 m2
odpad: 4%
Działanie: naprawy
operator: 2 osoby
koszt za jedną godzinę: 7 EUR
koszty pozostałe: 35 EUR/h
wydajność na godzinę: 100 m2
odpad: 4%
Działanie: naprawy
operator: 2 osoby
koszt za jedną godzinę: 7 EUR
koszty pozostałe: 35 EUR/h
wydajność na godzinę: 100 m2
odpad: 4%
Element X:
2x nakładarka walcowa lakieru UV
Element X:
2x nakładarka walcowa lakieru UV
Element Z:
2x nakładarka walcowa lakieru UV
Działanie: nakładarka walcowa lakieru UV
operator: 4 osoby
koszt robocizny: 9 EUR
koszty pozostałe: 90 EUR/h
wydajność na godzinę: 125 m2 płyty
Wydajność na godzinę: 80 m2
odpad: 4%
Działanie: nakładarka walcowa lakieru UV
operator: 4 osoby
koszt robocizny: 9 EUR
koszty pozostałe: 90 EUR/h
wydajność na godzinę: 125 m2 płyty
Wydajność na godzinę: 80 m2
odpad: 4%
Działanie: nakładarka walcowa lakieru UV
operator: 4 osoby
koszt robocizny: 9 EUR
koszty pozostałe: 90 EUR/h
wydajność na godzinę: 125 m2 płyty
Wydajność na godzinę: 80 m2
odpad: 4%
Element X:
lakierowanie krawędzi
Nakładarka walcowa lakieru UV
Element Y:
Formatowanie i wiercenie
Nakładarka walcowa lakieru UV
Element Z:
2x rozpylanie lakieru
Nakładarka walcowa lakieru UV



Rysunek 3.3. Przykład realizacji procesu technologicznego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstwa*)

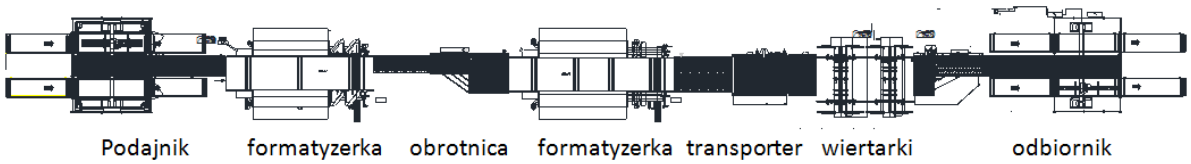
Jak pokazano na rysunku 3.3. w pierwszej kolejności pobierana jest klejonka sosnowa o wymiarze brutto z magazynu i następnie przechodzi przez etap kalibracji jednocześnie na dwóch płaszczyznach. Po otrzymaniu grubości elementu zgodnego ze specyfikacją, płyta przechodzi do etapu formatowania krawędzi oraz nawiercania płaszczyzn i boków. W zależności od typu wyrobu określa się liczbę produkowanych sztuk na minutę lub m^2 na godzinę oraz koszty związane z robocizną. W systemie również jest zawarta informacja o założeniach dotyczących liczby wadliwych elementów w stosunku do całej produkowanej partii. Liczba ta nie dotyczy samych wad wynikających ze struktury materiału, ale odnosi się do wykonanych operacji w stosunku do ustawiania parametrów maszyn dla realizacji procesu produkcyjnego. Kolejnym etapem jest wybarwienie krawędzi lakierem wodnym, a następnie po operacji szlifowania płaszczyzn do uzyskania wymiaru netto, lakierem UV. Profilowane elementy są barwione na automatach lakierniczych za pomocą lakierów wodno–UV. Ze względu na specyfikę drewna wszystkie elementy przechodzą przez etap kontroli i ewentualnej drobnej naprawy. Elementy niezgodne wracają z powrotem na wydział maszynowni lub są kierowane do przeróbki na inne wyroby. Finalnym etapem jest pakowanie. Koszty robocizny i pozostałe, normy wykonania oraz odpad, są kalkulowane na każdym etapie procesu technologicznego.

3.2.2 Charakterystyka techniczna złożonych systemów produkcyjnych w przedsiębiorstwach branży meblarskiej – centrów obróbczych

Przedsiębiorstwo, chcąc terminowo dostarczać wyprodukowane wyroby do odbiorcy, musi je wytworzyć zgodnie z zatwierdzonym planem realizacji zamówień. W praktyce oznacza to, że przepływ materiałów musi odbywać się zgodnie z przyjętym harmonogramem, w określonym czasie i w oparciu o wyznaczone do tego surowce. W przypadku masowej produkcji jest dość trudno w krótkim czasie zmienić gamę produkowanych wyrobów, ze względu na wysokie koszty magazynowania oraz czas dostarczenia surowców niezbędnych do uzyskania gotowego produktu. Istotne jest również samo przygotowanie niezbędnych części zamiennych ulegających zużywaniu się w wyniku procesu technologicznego lub uszkodzeniu (np.: frezy, głowice, wiertła).

Problem niezawodności obiektów o strukturze szeregowej, który przyjęto jako podstawę badawczą (z uwagi na strukturę linii technologicznej), należy interpretować w kategorii bezusterkowego funkcjonowania. Połączenie maszyn i urządzeń w taki sposób dotyczy stanu zdatności, który jest tylko wtedy, jeżeli wszystkie elementy systemu są w stanie zdatności. Obiekt uznaje się za niezdatny, jeżeli którykolwiek z jego elementów jest uszkodzony.

Stawiane oczekiwania wobec centrum obróbczego w omawianym przedsiębiorstwie dotyczą uzyskiwania z przetwarzanego materiału (elementu z drewna litego) przedmiotu o żądanym kształcie, wymiarze, dokładności i chropowatości powierzchni, a także wywierconych otworach okrągłych przelotowych i nieprzelotowych, o kształcie (walec, stożek) i średnicy uzależnionej od typu zastosowanego wiertła lub freza (Bajkowski, i inni.,1988; Karpiński, 2013). Przykład złożonego systemu technicznego pokazano na rysunku numer 3.4., natomiast jego szczegółowe elementy przedstawiono na rysunkach od 3.5. do 3.13.

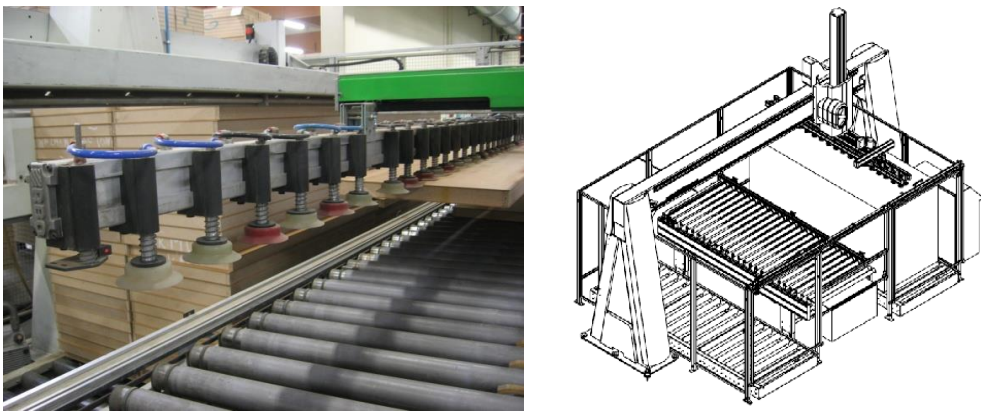


Rysunek 3.4. Przykład centrum obróbczego sterowanego numerycznie, wykorzystywanego w dużych przedsiębiorstwach produkcji mebli – jako złożony system techniczny o strukturze szeregowej.
(*Źródło: opracowanie własne*)

W skład złożonego systemu technicznego będącego przedmiotem dalszych badań, wchodzą następujące maszyny:

1. Podajnik i odbiornik

Maszyny ulokowane na początku i na końcu centrum obróbczego służą do automatycznego załadunku i rozładunku poddawanych obróbce technologicznej elementów (rys. 3.5). Obiekty służą do zautomatyzowanego podnoszenia paneli z drewna ze stosu, równego ułożenia ich na transporterze celem obróbki, a następnie odłożenia na stosie po zakończeniu procesu technologicznego.



Rysunek 3.5. Automatyczny podajnik i odbiornik.
(*Źródło: fotografia własna i materiały z przedsiębiorstwa*)

Charakterystyka pracy maszyn:

- Podajnik: dostarczane stosy z płytą są automatycznie ładowane na przenośnik rolkowy znajdujący się w roboczej części maszyny.
- Odbiornik: po zakończeniu procesu technologicznego elementy docierają do urządzenia transferowego podłączonego do maszyny i następnie podnoszone są przez przyssawki i odkładane są na przenośniku rolkowym w części roboczej urządzenia wyładowczego. Po uzyskaniu wymaganej wysokości stosu, elementy zostają automatycznie przetransportowane do miejsca poza częścią roboczą maszyny.

Charakterystykę parametrów elementów poddawanych procesowi obróbki zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Zakres parametrów obsługowych podajnika i odbiornika przeznaczonych do produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*)

Charakterystyka elementów możliwych do obsłużenia przez podajnik i odbiornik	
Maksymalna długość panelu	4450 mm
Maksymalna szerokość paneli jednorzędowych	1200 mm
Maksymalna szerokość paneli dwurzędowych	600 mm + 600 mm
Minimalna długość paneli	300 mm
Minimalna szerokość paneli jednorzędowych	240 mm
Minimalna szerokość paneli dwurzędowych	150 mm + 150 mm
Minimalna szerokość paneli	10 mm
Maksymalna szerokość paneli	60 mm
Maksymalna masa pojedynczych paneli	100 kg
Maksymalna wysokość stosu na palecie	1600 mm

Maszyny użytkuje się w trzech trybach pracy:

- tryb ręczny, kiedy przenośnik rolkowy nie pracuje w trybie automatycznym, a operator ma możliwość ręcznie obsługiwać drzwi ochronne;
- tryb półautomatyczny, w którym rolki transportera napędzane są przez silnik, a operator ręcznie przesuwa drzwi ochronne;
- tryb automatyczny, kiedy rolki transportera są napędzane silnikiem oraz automatycznie przesuwają się drzwi ochronne pobierając kolejne palety ze stosu.

Liczbę cyki pracy na minutę dla podajnika i odbiornika zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Liczba cykli pracy na minutę. (*Źródło: opracowanie własne*)

Czas opróżnienia depozytu (sek.)	**Częstość poboru i odbioru elementów o masie poniżej 50 kg (cykle/min)**	**Częstość poboru i odbioru elementów o masie powyżej 50 kg (cykle/min)**
0,75	16	14
1,75	13	12
2,75	11	10

2. Frezarko–czopiarki

W opisywanych przedsiębiorstwach maszyny należą do klasy obrabiarek przelotowych przeznaczonych do obróbki elementów z drewna. Konstrukcja maszyny jest dwustronna i zazwyczaj zaliczana do klasy pilarek tarczowych, ponieważ proces polega na piłowaniu formatyzującym, zwykle stanowiąc ich główne wyposażenie. Praca formatyzerek polega na formatowaniu płyt do wymiaru netto oraz ewentualnym wykonywaniu złączeń czopowych. Czopiarka umożliwia obróbkę czopów i widlic szczególnie w przypadku elementów składowych ram czy innych graniaków oraz wykonanie żądanego profilu lub fazki. W skład wyposażenia obrabiarek wchodzą agregaty piłujące, formatujące oraz szlifujące (Kien i Osajda, 2013). Zaletą maszyn jest możliwość obróbki elementów o minimalnych wymiarach. Na rysunku 3.6 pokazano ogólny wygląd frezarko–czopiarki.



Rysunek 3.6. Frezarko–czopiarka. (*Źródło: fotografia własna za zgodą przedsiębiorstwa*)

Wyposażenie frezarko–czopiarki:

Budowa frezarki jest symetryczna w stosunku do każdej ze stron co oznacza, że te same agregaty znajdują się w tym samym miejscu po przeciwnej stronie urządzenia. Jedna strona urządzenia posiada dwa zespoły wrzecion piłowych (piłę główną i podcinającą) oraz zespoły wrzecion frezarskich zaopatrzone w głowice przeznaczonych do obróbki skrawaniem podczas którego obrotowe ostrza wykonując ruch obrotowy lub posuwowy, uzyskując przez to zamierzoną formę i kształt (Kien i Osajda, 2013). Na końcu jest zamocowany agregat szlifierski pracujący zarówno z prostymi profilami jak i z dodatkowo montowanymi głowicami nadający np. promień lub fazkę.

Obróbka elementów na frezarko–czopiarkach odbywa się za pomocą ruchu posuwowego przy dużych prędkościach. Zasada działania obrabiarek polega na tym, że element przy pomocy ruchu posuwowego zostaje poddany operacji piłowania, frezowania i szlifowania. W ten sposób procesowi technologicznemu poddawane są kolejno dwie krawędzie wzdłużne, a następnie dwie poprzeczne produkowanych elementów, takie jak np.: wieńce, boki, półki lub płyciny. W skład jednej pary wchodzi mniejszy i krótszy przenośnik górny oraz większy i dłuższy przenośnik dolny. Przenośniki górne spełniają również rolę docisku elementu w strefie obróbki. Chcąc dopasować szerokość formatowanego elementu, regulacja odbywa się tylko przy pomocy jednej strony. Strona przeciwna jest nieruchoma. Rozstaw maszyn odbywa się przy pomocy prowadnicy i śruby tocznej.

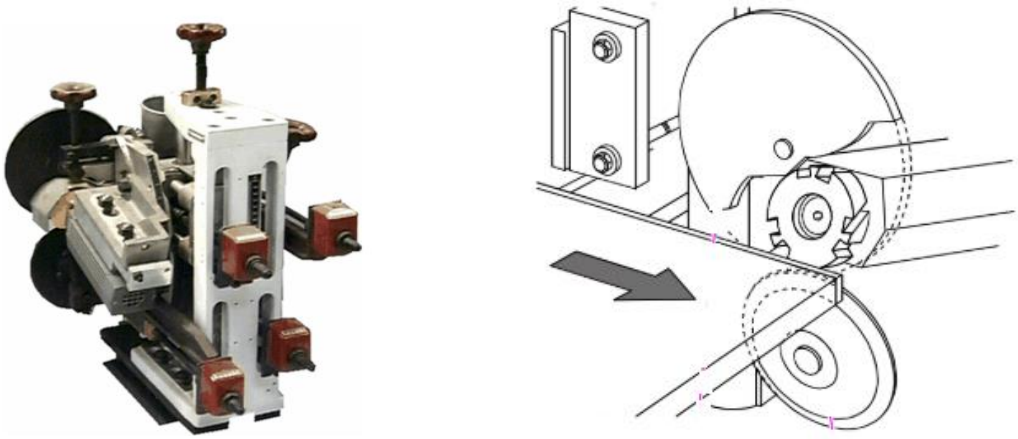
Wyróżnia się następujące agregaty przeznaczone do obróbki skrawaniem:

- maszyna bazowa, przeznaczona do formatowania, strugania, profilowania, frezowania skośnego oraz rowkowania w obszarze formatowania przy dużych prędkościach. Urządzenie przedstawiono na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7. Maszyna bazowa. (*Źródło: materiały z przedsiębiorstwa*)

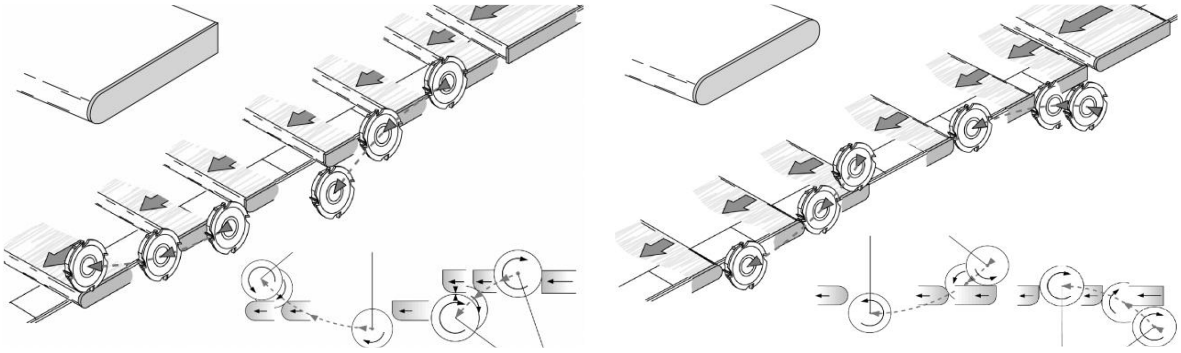
Agregat frezowania dokładnego jest przeznaczony do dokładnego frezowania promieni, fazek oraz profili na górnej i dolnej krawędzi obrabianego przedmiotu. Sam agregat składa się z dwóch zespołów frezowania, które pracując równocześnie od dołu i od góry, wykonują dokładną obróbkę krawędzi. Agregat przedstawiono na rysunku 3.8. W trakcie obróbki, prowadzony element przez rolki wodzące fazowany jest za pomocą freza, następnie profilowany, w celu uzyskania gładkiej powierzchni krawędzi. W opisywanym przypadku wyróżniono następujące agregaty:



Rysunek 3.8. Agregat dokładnego frezowania.
(*Źródło: opracowanie na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

- standardowy agregat frezujący, przeznaczony do formatowania, strugania profilowego oraz frezowania skośnego i rowkowania w obrębie formatowania. Wrzeciono przeznaczone jest do szybkiej obróbki skrawaniem;

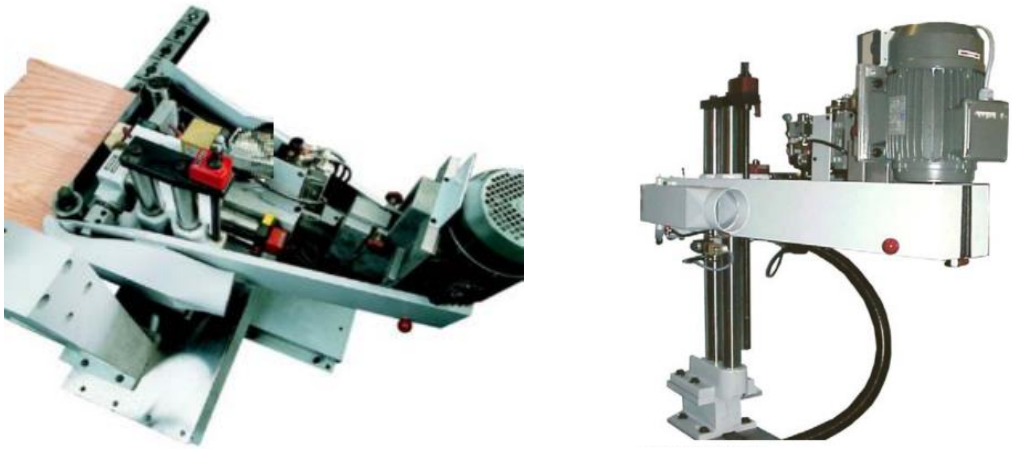
- agregat frezowania kształtowego, który ma za zadanie dopasowywanie do kształtu materiału o wymiarze brutto na kształt o żądanym profilu, promieniu lub fazce o wymiarze netto. Przebieg działania polega na pracy dwóch narzędzi, gdzie w pierwszej kolejności jest formatowana przednia krawędź elementu a następnie narzędzie jest zabierane przez obrabiany przedmiot za pomocą zderzaka, kopiując jego profil. Następnie pozostaje pod lub ponad obrabianym przedmiotem do momentu całkowitego przejścia wytwarzanego elementu i powraca do stanu gotowości. Tylna krawędź frezowana jest również przez dwa narzędzia, które śledzą obrabiany przedmiot i kopiują profil obrabianego przedmiotu. Po wykonaniu operacji powracają do stanu gotowości (rys. 3.9).



a) krawędź przednia obrabianego elementu b) krawędź tylna obrabianego elementu

Rysunek 3.9. Przebieg procesu skrawania przedniej i tylnej krawędzi elementu.
(*Źródło: opracowano na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

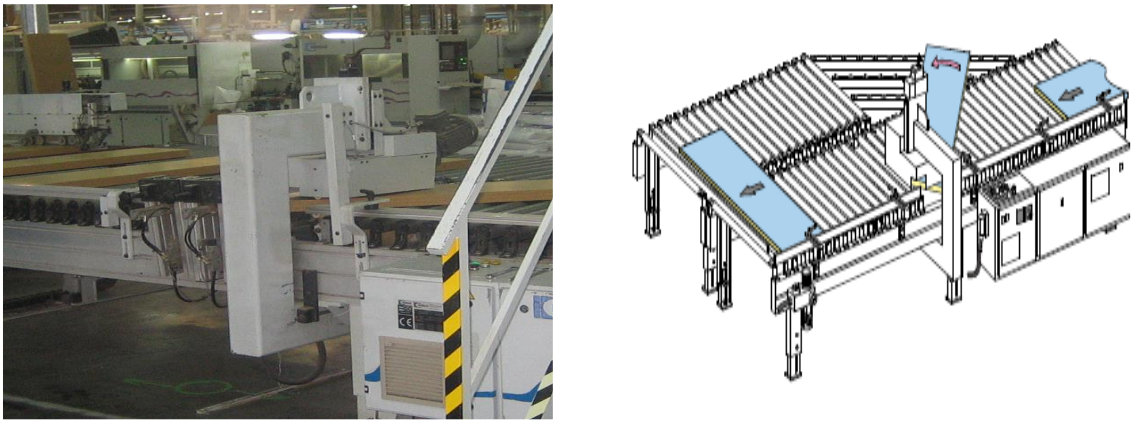
- agregat szlifujący, który jest przeznaczony do szlifowania krawędzi i profili. Sam jest wychylny co pozwala na jego regulację w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Sama płoza szlifierki jest sterowana elektropneumatycznie, a nacisk nadawany jest pneumatycznie. Agregat szlifierki przedstawiono na rysunku 3.10.



Rysunek. 3.10. Agregat szlifujący.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

3. Obrotnica

Stacja obracania (rys. 3.11) jest przeznaczona do zmiany kąta poddanego obróbce elementu o kąt 90^{o} za pomocą stożków obrotowych, celem poddania go dalszemu etapowi procesu.



Rysunek 3.11. Proces obracania elementu o kąt 90^{o}.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

Produkowane elementy ze względu na własne własności są w pierwszej kolejności skrawane wzdłużnie a następnie obracane celem obróbki poprzecznej. W takim położeniu również poddawane są procesowi wiercenia a następnie ponownie obracane celem ułożenia na palecie. Charakterystykę parametrów procesu obróbki zestawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Zakres możliwości obsługi elementów poddanych obróbce dla stacji obracania.
(Źródło: opracowanie własne)

Parametry	**Wartości**
Minimalna długość elementu	250 mm
Maksymalna długość elementu w zależności od długości transportera	2000 ÷ 3500 mm
Minimalna szerokość elementu	220 mm
Maksymalna szerokość elementu	1200 mm
Grubość elementu	12 ÷ 60 mm
Prędkość pracy centrum obróbczego	8 ÷ 100 m/min

4. Wiertarki przelotowe

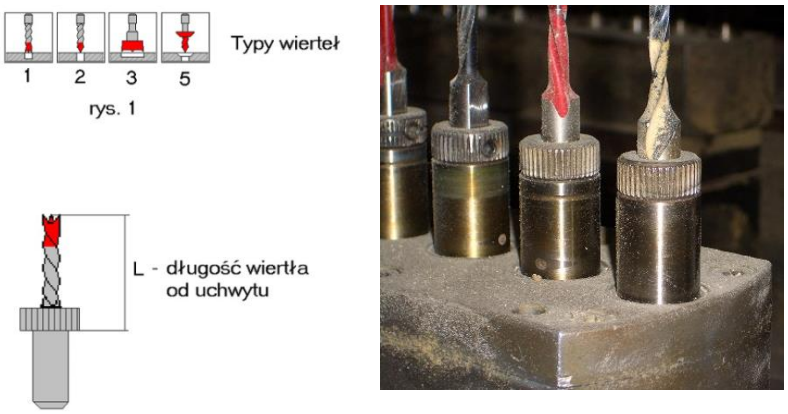
Wiertarki należą do klasy obrabiarek przeznaczonych do wiercenia w elementach z drewna litego otworów okrągłych, przelotowych i nieprzelotowych. Kształt i wymiary maszyn są uzależnione od typu zastosowanego wiertła (Bajkowski, i in., 1988; Costes, i in., 2004; Gawroński, 2009). Wyróżnia się wiertarki jednostronne, dwustronne, czterostronne i sześciostronne. Przedsiębiorstwa, mając na uwadze własny rozwój oraz zmienność asortymentu, często inwestują w urządzenia z dodatkowymi funkcjami, które mogłyby być wykorzystane w przyszłości, na przykład: możliwość zwiększenia prędkości, funkcje wiercenia w czterech lub sześciu płaszczyznach elementu. Do obróbki prostych, prostokątnych elementów, jak na przykład wieńce górne, wieńce dolne, przegrody, boki, półki, dna i fronty, najczęściej stosuje się wiertarki numeryczne wyposażone w głowice wielowrzecionowe, przystosowane do wierceń w pięciu płaszczyznach. Wiercenia mogą być wykonywane wzdłuż osi X, Y i Z. Konstrukcję nośną maszyny stanowią: łoże dolne, stojaki boczne oraz dwie belki górne. Są to spawane elektrycznie grubościenne, stalowe profile zamknięte. Stanowią one podstawę do zamocowania agregatów wiertarskich. Na łożu dolnym umieszczone są dwie poprzeczne belki stanowiące stół podawczo–obróbczy maszyny. Prawa belka jest ruchoma. Przesuwa się ona po precyzyjnych prowadnicach liniowych, a napęd z silnika elektrycznego przekazywany jest za pomocą śruby. Pneumatycznie przesuwają się suporty urządzenia. Pozycjonowanie odbywa się z pozycji panelu sterującego, znajdującego się z prawej strony wiertarki. Zakres przesuwu – wzdłuż osi X, pozwala na obróbkę elementów w przedziale długości od 350 do 2300 mm. Przykład wiertarki przelotowej pokazano na rysunku 3.12.



Rysunek 3.12. Przykład wiertarki przelotowej.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

Pozycjonowanie agregatów wzdłuż osi X zachodzi przy pomocy serwonapędu i listwy zębatej, pracującej do prędkości do 0,3 m/s. Regulacja wzdłuż osi Y i Z przebiega automatycznie. Typowe wrzeciona wiertarskie napędzane są kontrolowanym przez inwerter silnikiem elektrycznym o mocy 0–54 kW, pracującym z prędkością obrotową 7200 obr/min.

Obróbka otworów, tzw. wiercenie, rozwiercanie i pogłębianie, polega na wykonywaniu ruchu głównego, ruchu obrotowego oraz ruchu posuwowego zamocowanych narzędzi na głowicach wiertniczych (rys. 3.14.). Wiertła służą do wykonywania otworów, gniazd, a także do wywiercania miejsc wadliwych oraz do wykonywania zatyczek i kołków służących do naprawy wywierconych gniazd. Przykład stosowanych wierteł w przedsiębiorstwie przedstawiono na rysunku 3.13.



Rysunek 3.13. Odmiany obróbki otworów oraz osadzenie wierteł w głowicy do wiercenia drewna. (*Źródło: fotografia własna i na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*)

5. Obsługa centrum obróbczego

Współczesne centra obróbcze umożliwiają ustawienie parametrów maszyn w oparciu o zapisany program na dyskietce, którą operatorzy otrzymują wraz z częściami ruchomymi z wydziału narzędziowni. Zadaniem operatora obsługującego dany element centrum obróbczego jest instalacja programu *System narzędziowy* (z dokumentów przedsiębiorstwa). Dokumentacja technologiczna oraz niezbędne ustawienia realizujące zlecenie, a także potrzebne części ruchome z właściwie osadzonymi narzędziami, pobierane są przez operatorów frezarki i wiertarki z wydziału ostrzarni. Po wgraniu programu, operatorzy elementów linii produkcyjnej ustawiają wspólną bazę dla wykonującego pracę narzędzia, określają prędkość linii oraz przeprowadzają testy poprawnego przebiegu procesu, w celu sprawdzenia poprawności programu. Następnie, po skontrolowaniu wszelkich zadanych parametrów na stole pomiarowym, posiłkując się dokumentacją techniczną dla wyrobu, przystępują do realizacji całego zlecenia. Po zre-

alizowaniu zamówienia, w pierwszej kolejności operatorzy oczyszczają maszynę z nagromadzonych trocin spod agregatów, głowic i prowadnic, a następnie dokonują demontażu części ruchomych. Starannie oczyszczone narzędzia do obróbki odkładają na wózek wraz z dokumentacją i oddają do wydziału ostrzarni, informując pracownika o ich aktualnym stanie technicznym.

Operatorzy odpowiedzialni za automatyczne podawanie i odbieranie produkowanych elementów przez centrum obróbcze ponoszą odpowiedzialność za właściwy dobór produkowanych elementów, zgodnie ze złożonym zleceniem oraz pełnią obsługę automatycznych podajników i odbiorników. Do ich zadań należy właściwy dobór podciśnienia niezbędnego do pracy tzw. vakuum oraz wstępna lub końcowa ocena produkowanego materiału.

3.2.3 Koszty awarii

Produkcja wielotysięcznych serii w krótkim czasie, choć optymalna dla takich linii produkcyjnych, stanowi pewne ograniczenia w postaci zamrożonego kapitału i podpisanych umów na planowanie dostaw płyty z klejonki sosnowej o określonym kształcie, wymiarze i przeznaczeniu, oraz pozostałych materiałów i narzędzi niezbędnych do wyprodukowania mebli. W przypadku wystąpienia awarii na każdej z maszyn centrum obróbczego realizującego zadany proces technologiczny, dochodzi do przestojów (braku przetwarzanego materiału), a co za tym idzie, strat związanych z kapitałem ludzkim i pełnym wykorzystaniem możliwości produkcyjnych na pozostałych liniach produkcyjnych oraz stanowiskach pracy. Przy prowadzeniu seryjnej produkcji mebli w przypadku przestoju centrum obróbczego przedsiębiorstwo ponosi straty finansowe, ponieważ ostatecznie na wydziale pakowni, na skutek opóźnień w realizacji zamówienia ostatecznie nie zostaje terminowo spakowany zaplanowany wyrób końcowy. Warto także nadmienić, że koszt zakupu nowoczesnego technologicznie centrum obróbczego szacowany jest w milionach euro. Stopień skomplikowania centrum obróbczego oraz jego właściwa instalacja i montaż (np. połączenie w jedną linię, dostęp do wyciągów, zajęcie powierzchni produkcyjnej, masa maszyny, czas montażu obiektu) powoduje, że systemy te nie posiadają rezerwy w postaci maszyn i urządzeń.

Ocena kosztów produkowanego elementu powstaje w wyniku założeń budżetowych, opracowanych norm wykonania (rys. 3.3.), czasu dostępności maszyny oraz zapotrzebowania na jej dostępność. Na podstawie takiej dystrybucji kosztów przedsiębiorstwo określa koszt jednej minuty każdego centrum roboczego w przedsiębiorstwie. Przykładowy rozkład kosztów dla

4 wybranych przedsiębiorstw i ich centrów obróbczych (linii formatująco–wiercących) przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Rozkład kosztów alokowanych do centrów obróbczych w 4 wybranych przedsiębiorstwach – wartości dla 1 minuty pracy. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstw*)

	Zestawienie kosztów [PLN/min]						
Przedsiębiorstwo	**Pracownicy bezpośredni**	**Pozostałe bezpośrednie**	**Niebezpośrednie**	**Deprecjacja**	**ROCE**	**Administracyjne**	**Razem**
Polska – zakład A	2,38	1,94	3,01	1,9	0,68	0,17	10,08
Polska – zakład B	2,09	2,88	2,4	5,06	0,3	0,12	12,85
Rosja	2,26	1,84	2,09	1,45	1,09	0,63	9,35
Słowacja	6,35	3,70	4,42	4,85	0,26	0,35	19,94

Powyższe kwoty pozwalają oszacować (tab. 3.4), że każda minuta przestoju daje wartość średnią około 13 PLN. Jeśli przyjąć koszt przestoju dla zakładu A w Polsce (tab. 3.4), to jedna minuta daje wartość około 10 PLN, co w przeliczeniu na jedną godzinę wynosi 600 PLN. Odnosząc się bezpośrednio do wskazanego zakładu A, nie będą to kwoty znacznie obciążające. Jednakże opisywane linie produkcyjne są liniami kluczowymi i nie można wykluczyć ich niedostępności ze względu na przebieg realizacji procesu technologicznego. Przyjmując, że linia ulega zatrzymaniu na okres jednej godziny, a w tym czasie miała możliwość wyprodukować przykładowo 800 szt. elementów, to wymierna wartość straty dla linii będzie wynosić 600 PLN. Opóźnienie dostawy na wydział lakierni, a następnie pakowni, wyniesie ponad godzinę. Skoro pakownia w okresie jednej godziny może spakować 500 kompletów mebli na jednej linii, których wartość obrotu wyniesie ok. 116 350 PLN/h (z danych przedsiębiorstwa), to opóźnienie dostaw powoduje realną stratę.

Podczas kilkunastoletnich obserwacji w kilkunastu zakładach produkujących meble oraz w wyniku zestawionych kosztów w tabeli 3.4 stwierdzono, że centra obróbcze ze względu na: liczbę sztuk w przedsiębiorstwie, koszt oraz zajmowaną powierzchnię, stanowią newralgiczne ogniwo w operacjach technologicznych realizowanych przy produkcji mebli. Dlatego też linie produkcyjne o strukturze szeregowej uznaje się za kluczowe systemy techniczne, decydujące o ciągłości (lub jej braku) w realizacji planu produkcyjnego.

3.3 Metody oceny efektywności eksploatacji stosowane w badanych przedsiębiorstwach

3.3.1 Znaczenie badań wstępnych

Koncepcja budowy modelu przewidującego zdarzenia awaryjne może wygenerować nową strategię działań obsługowych, a także metod opracowywania planów produkcyjnych. Dotyczy to przedsiębiorstw o podobnym profilu do branży meblarskiej, tzn. charakteryzujących się stałym i powtarzalnym obciążeniem centrów obróbczych, z uwzględnieniem dotychczas stosowanych metod pomiarowych wykorzystywanych do oceny funkcjonalności, takich jak dane historyczne odnoszące się do stanów niezdatności systemów technicznych. Prace te mogłyby przebiegać w zależności od bieżących potrzeb przedsiębiorstw, podobnie jak ma to miejsce w metodzie „dokładnie na czas" (ang. *Just in Time*[5]), wpływając na efektywniejszą pracę maszyn w dobie produkcji 4.0[6] (ang. Industry 4.0), w której realizacja zadań będzie przebiegać bezobsługowo. Próba znalezienia zależności pomiędzy występowaniem awarii elementów złożonego systemu technicznego trwających powyżej 9,99 minuty a planowanym czasem na realizację zadania, lub też awaryjnością spowodowaną obciążeniem w wyniku masy produkowanych elementów, stanowi perspektywiczny obszar badawczy autora.

3.3.2 Wskaźnik OEE i jego wykorzystanie

W początkowym etapie badań, przeprowadzono ocenę czterech złożonych systemów technicznych o strukturze szeregowej za pomocą stosowanej przez przedsiębiorstwa miary OEE[7]. Do obliczenia wskaźnika wykorzystano informację o liczbie wyprodukowanych elementów w stosunku do czasu operacyjnego oraz wszystkie zaraportowane przestoje centrum obróbczego (tab. 3.5).

Zestawione dane z czterech centrów obróbczych za okres jednego pełnego roku pracy maszyn i urządzeń (tab. 3.5) pokazują, że ogólny model OEE nie dostarcza pełnej wiedzy z zakresu występowania awarii technicznej. Problem ten dostrzeżono już w literaturze (Zammori, i in., 2011; Hossian i Sarker, 2016).

---

[5] koncepcja Just in Time, polega na dostarczeniu przedsiębiorstwu tylko tego co jest potrzebne, wtedy, kiedy jest potrzebne i dokładnie tam, gdzie jest potrzebne (Ficoń, 2001)

[6] Przemysłu 4.0. opisuje system produkcyjny przedsiębiorstwa, który w przyszłości będzie składał się systemu informacji oraz maszyn sterowanych numerycznie, które będą działać w sposób autonomiczny i wykazywać elementy sztucznej inteligencji. Przemysł 4.0 oznacza czwartą rewolucję przemysłową, w której przyjmuje się, że jest to wizja inteligentnych fabryk zbudowanych z inteligentnych cyber–fizycznych systemów (Hermann, i in., 2015; Iwański, 2017)

[7] Miarę OEE przedstawiono w rozdziale 2.3.3. (wzór 2.27)

Tabela 3.5. Przykładowe wartości wskaźnika OEE dla złożonych systemów technicznych (ZST) w wybranych przedsiębiorstwach.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstw*)

ZST Nr / Wskaźnik	zakład A	zakład B	zakład C	zakład D
Dostępność	60%	58%	58%	61%
Wydajność	65%	60%	59%	66%
Jakość	99,56%	99,61%	99,62%	99,86%
OEE	**38,98%**	**34,25%**	**34,17%**	**40,71%**

W przypadku opisywanych ZST, mimo iż uzyskiwana jakość produkowanych elementów jest wysoka (od 99,56% do 99,86%), to ostatecznie wartość wskaźnika OEE nie jest akceptowana przez zarząd (od 34,17% do 40,71%). Wysoką wartość wskaźnika dotyczącego jakości można interpretować jako brak metody sortowania wadliwych elementów w trakcie obróbki. Wady elementów, które ujawniają się dopiero po wybarwieniu krawędzi lub/i płaszczyzn, znacznie obniżając wskaźnik jakości na pozostałych liniach produkcyjnych. Warto także mieć na uwadze, że stosowana miara odnosi się głównie do weryfikacji założonych planów względem wykonania produkcji, a nie oceny stanu technicznego maszyn.

Do oceny czasu poprawnej pracy oraz czasu odnowy systemu technicznego przedsiębiorstwa wykorzystują wskaźniki MTTR, MTTF, MTBF (rozdz. 2.3.3.). W tabeli 3.6. zestawiono uzyskane wyniki pomiaru z każdego miesiąca za okres jednego roku dla wybranego centrum obróbczego.

Z tabeli 3.6 wynika, że średni czas awarii (poziom techniczny) w każdym miesiącu wynosi średnio1739 minut. Można też oczekiwać około 200 przypadków stanu niezdatności o średnim czasie naprawy wynoszącym 8 minut Przyjmując, że koszt jednej minuty przestoju z powodu awarii to ok 10PLN, to miesięczna strata finansowa będzie wynosić ok 17390 PLN[8] a w okresie jednego roku 208680 PLN. O ile można kalkulować straty finansowe w wyniku zaraportowanych awarii, to czas samej naprawy wydaje się mało realny. W tak krótkim czasie wydaje się niemożliwe zlokalizowanie miejsca zdarzenia, określenie przyczyny, wezwanie służb utrzymania ruchu oraz wykonanie stosownej naprawy lub wymiany zużytej części. Także

[8] obliczone miary wykonano dla „zakładu A”(tab. 3.4.) , gdzie koszt postoju jednej minuty=10,08 PLN

prawdopodobieństwo, że awaria wystąpi średnio co 184 minuty jest niskie, choćby ze względu na czasy realizacji produkcji partii określonego wyrobu

Tabela 3.6. Przykład wartości wskaźników: MTTR, MTTF, MTBF z okresu jednego roku dla wybranego centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstw)*

Miesiąc	styczeń	luty	marzec		październik	listopad	grudzień	średnia/ mies.
Poziom techniczny								
czas [min]	2154	2547	1797		1627	1910	2538	**1739**
liczba [szt.]	246	249	219		213	231	206	**208**
MTTR [min]	9	10	8	**…**	8	8	12	**8**
MTTF [min]	161	152	196		202	166	155	**184**
MTBF [min]	170	162	204		210	175	168	**192**
Poziom prewencyjny								
czas [min]	6742	5056	6757		5996	6097	4152	**5617**
liczba [szt.]	230	232	258		216	242	167	**214**
MTTR [min]	29	22	26	**…**	28	25	25	**26**
MTTF [min]	152	152	147		179	141	182	**162**
MTBF [min]	182	174	173		207	167	207	**188**
Poziom zarządzania								
czas [min]	16556	12490	13375		15300	13174	19556	**17075**
liczba [szt.]	209	207	176		187	174	152	**171**
MTTR [min]	79	60	76	**…**	82	76	129	**106**
MTTF [min]	121	134	178		157	156	99	**129**
MTBF [min]	200	195	254		239	232	227	**235**

Można oczywiście wnioskować, że stosowane miary (MTTR, MTTF, MTBF, OEE) w przedsiębiorstwie dają informację, która w pewnym stopniu dostarcza wiedzy o niezdatności maszyn. Jednak wskaźnikami można dość łatwo „manipulować" dodając czasy „mikro–awarii"(awaria do 10 minut), przez co wyciągnięcie wniosków nie daje większego prawdopodobieństwa, że dojdzie do jej wystąpienia. Taka informacja ma istotne znaczenie podczas sporządzania planów produkcyjnych. Odnosząc się do miary OEE (ta. 3.5.) można zauważyć, że np. wskaźnik jakości wynosi prawie 100%. W powyższym przypadku wady elementów po obróbce skrawaniem uwidoczniają się w kolejnym etapie procesu, przez co zawyżają jego wartość na centrum obróbczym. Manipulacja miarą dotyczy także sterowania prędkością linii. W wyniku ustawienia parametrów pracy centrum obróbczego można uzyskać wskaźnik OEE nawet na poziomie 120%, co ze względów oczywistych nie może być prawdą. Jednakże miary pokazują obszary, które należy usprawniać przy udziale i zaangażowaniu wszystkich pracowników przedsiębiorstwa.

Celem dogłębnej analizy, w jaki sposób i co operatorzy centrów technicznych zapisują w systemie, należy zapoznać się z metodami raportowania, jakie zostały przyjęte przez przedsiębiorstwa. Z uwagi na przedmiot rozprawy, w dalszej części skupiono się głównie na awariach technicznych. Koncepcję oraz wyniki badań pokazano w rozdziale 3.3.3.

3.3.3 Metody raportowania występujących przestojów

Zakłady koncernu stosują system informatyczny *Operator*. Służy on do nadzorowania stanu technicznego maszyn i sporządzania raportów dotyczących realizowanego procesu produkcyjnego w tym liczby produkowanych sztuk oraz czasów ich obróbki technologicznej. Program umożliwia gromadzenie informacji o efektywności produkcyjnej, stanowiąc bazę do obliczeń KPI (ang. Key Performance Indicator) takich jak OEE, MTTF, MTTR oraz określenia ram planowania realizacji produkcji. Program pozwala na obliczenie możliwości produkcyjnych jednostki w oparciu o elektroniczny raport zlecenia oraz realizacji wykonania, a także pozwala na zapis wszystkich zdarzeń powodujących każdorazowe zatrzymanie centrum obróbczego. Wśród raportowanych przez operatorów informacji można wyróżnić m.in.:

1. ewidencję wykonania zamówień produkcyjnych na każdej zmianie,
2. zapis informacji odnośnie zatrzymania linii produkcyjnej,
3. ogólny zapis w przypadku awarii technicznej oraz ogólną przyczynę jej wystąpienia,
4. systemowy zapis zarządzania obrotem materiałowym, dokumentacją maszyn, gwarancjami oraz zapisem dokonywanych przeglądów elementów systemu technicznego,
5. wymianą informacji przez służby utrzymania ruchu pomiędzy innymi zakładami o podobnym profilu w celu lepszego zarządzania częściami zamiennymi (lokalizacje zakładów umożliwiają dostarczenie części zamiennych do kilku godzin, obniżając koszty magazynowania w każdej z jednostek) oraz podnoszenie w ten sposób efektywnej współpracy z zakresu obsługi i naprawy maszyn przez służby utrzymania ruchu,
6. archiwizacji informacji w celu eliminacji potencjalnych błędów i usprawnienia przyszłych maszyn (SUR).

Przykładowe informacje dotyczące badanego złożonego systemu technicznego zapisywane są w postaci kodów (tab. 3.7), które odnotowuje operator w systemie. W przypadku wystąpienia awarii technicznej dodatkowe informacje do systemu są uzupełniane przez pracownika utrzymania ruchu.

Tabela 3.7. Przykładowe zestawienie kodów wraz z interpretacją. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa*)

100	Nie planowany czas pracy	491	Postój Micro–Stop
210	Brak zamówień	500	Awaria centrum obróbczego
220	R&D testy	501	Test poprawnego ustawienia
400	Oczekiwanie na materiał	507	Awaria obrotnicy
410	Ustawienie maszyny	508	Awaria frezarki
411	Rozruch maszyny	510	Awaria mechaniczna
412	Dostrajanie w trakcie produkcji	513	Awaria odbiornika
420	Przerwa na posiłek	514	Awaria podajnika
421	Spotkanie	517	Awaria transportera
430	Problemy z jakością produkowanych elementów	520	Awaria elektryczna
440	Wymiana części ruchomych w trakcie produkcji	521	Awaria wiertarki
447	Oczekiwanie na części ruchome z magazynu	523	Awaria skanera
450	Konserwacja maszyny	525	Awaria czujników
451	Oczekiwanie na pracownika SUR	526	Awaria–niezdefiniowane
460	Oczyszczanie maszyny	540	Awaria sterowania
470	Brak materiału	900	Awaria–infrastruktura
477	Zator produkowanych elementów	910	Awaria sprężarki
478	Poprawki produkcji	920	Awaria wyciągów
479	Awaria szlifierki	980	Awaria programu Operator
480	Brak obsady	990	Błąd obsługi
490	Niezdefiniowane	999	Błąd wyboru kodu

Zapisując informację o przyczynie przestoju, operator jest zobowiązany wpisać jeden z dostępnych kodów, co powoduje automatyczne wyświetlenie się powodu zdarzenia. Przykład wyjaśniający, kiedy należy zastosować odpowiednie kody zdarzeń powodujących zatrzymanie systemu technicznego, pokazano w tabeli 3.8.

Pozyskana wiedza o sposobach zapisu informacji o występujących przestojach, umożliwiła autorowi na wyszczególnienie zapisanych informacji o mikro–awariach oraz awariach trwających powyżej 10 minut (rozdz. 3.3.4).

Tabela 3.8. Opis kodów stosowanych przez przedsiębiorstwo.
(Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa)

Standard używania kodów w programie Operator Light				
Czas awarii – jest czasem przestoju, w którym maszyna nie produkuje elementów z powodu problemów technicznych związanych bezpośrednio z infrastrukturą lub obiektem – sprężone powietrze, wyciągi. Szczegółowy raport awarii – gdzie, co, jak itd.. zapisuje pracownik utrzymania ruchu w systemie po otrzymanym zgłoszeniu/przyjęciu/usunięciu awarii.				
Typ kodu/rodzina	**Numer kodu w Operator Light**	**Opis kodu w Operator Light**	**Kiedy należy używać kodu?**	**Dlaczego należy używać kodu?**
Czas awarii typ: awaria	**910**	**Sprężone powietrze**	Sprężone powietrze należy używać do raportowania: • problemów technicznych związanych ze sprężonym powietrzem • brak sprężonego powietrza na maszynach/liniach	W celu uzyskania wiarygodnych danych na temat przestojów i móc z nimi pracować, redukując liczbę występujących awarii.
Czas awarii typ: awaria	**920**	**Wyciągi**	Wyciągi należy używać do raportowania: • problemów technicznych związanych z systemem wyciągów występujących na maszynach/liniach	W celu uzyskania wiarygodnych danych na temat przestojów i móc z nimi pracować, redukując liczbę występujących awarii.

3.3.4 Koncepcja nowego raportowania stanów niezdatności

W celu właściwego doboru informacji służących do podjęcia badań o potrójnym układzie kryteriów awaryjności, wyróżniono trzy kategorie przestojów (Loska, 2013; Szwedzka i Jasiulewicz-Kaczmarek, 2016). Pierwsza grupa zależy od efektywności eksploatacyjnej w ujęciu technicznym, skupiając się na obserwacji przestojów w momencie wystąpienia uszkodzenia systemu technicznego, czyli przejście ze stanu zdatności do niezdatności. Druga skupiona jest na działaniach profilaktycznych prowadzonych przez operatorów maszyn i służb utrzymania ruchu (SUR). Trzecią grupę przestojów stanowią czynności zależne od przyjętej metody kierowania organizacją oraz przyjętych norm wykonania dla produkowanych elementów (Żółtow-

ski, 2012). Autor rozprawy do przytoczonego modelu oceny dodał czwartą kategorię – informacyjną. Przyjęto w pracy, że stan niezdatności złożonego systemu technicznego trwający poniżej 10 minut nie powoduje uszkodzenia centrum obróbczego wymagającego ingerencji SUR. Natomiast przyczyny mikro–awarii, dają wiedzę o problemach występujących w trakcie realizacji procesów technologicznych, wskazując z jakimi usterkami najczęściej spotykają się pracownicy obsługujący systemy techniczne. Charakterystykę kategorii przestojów dla powyższej koncepcji przedstawiono w tabeli 3.9.

Tabela 3.9. Charakterystyka kategorii przestojów. (*Źródło: opracowanie własne*)

Kategoria przestoju	**Poziom techniczny**	**Poziom prewencyjny**	**Poziom zarządzania**	**Poziom informacyjny**
Charakterystyka	Określa techniczny stan niezdatności podsystemu	Określa działania obsługowe wydłużające żywotność podsystemów technicznych	Określa stan realizowanych procesów technologicznych i organizacyjnych w przedsiębiorstwie	Informacja o potencjalnej możliwości niezdatności podsystemu
Przedmiot	Awarie maszyn: frezarka, wiertarka, transport, podajnik i odbiornik, skaner, wyciągi, sprężarka, awaria elektryczna i mechaniczna, rozruch (spadek napięcia)	konserwacja, czyszczenie maszyny, kalibracja ustawień, przezbrojenie	przerwa śniadaniowa brak materiału, brak miejsca	mikro-zatrzymania do 10 min (ang. *micro –stop*)

Wybór czwartej kategorii „informacyjnej" został oparty o analizę wszystkich występujących mikro–awarii, gdzie zauważono, że wszystkie problematyczne sytuacje były rozwiązywane przez operatorów. Oznacza to, że nie było konieczności wzywania Służb Utrzymania Ruchu celem rozwiązania problemu. Wśród przykładów można podać np. kod 460 „ oczyszczanie maszyny" (tab. 3.7.), kiedy operator przy pomocy sprzężonego powietrza oczyszcza fotokomórkę, która wskazuje, że maszyna ma wykonać określoną operację. Takie zdarzenie powstaje w wyniku nadmiaru trocin i powstałego pyłu zarówno w trakcie obróbki skrawaniem jak i wiercenia. Nie jest to awaria, która wymagałaby ingerencji SUR lecz informacja, że należałoby usprawnić system zdmuchujący. Kolejnym przykładem może być przykład awarii na podajniku (kod 514 w tab. 3.7), kiedy operator zauważył, że z ramienia podającego wypadła przyssawka przeznaczona do podniesienia elementu z palety. Oznacza to, że nie została właściwie

zainstalowana lub poluzowała się w trakcie pracy. Zaistniałą sytuacje można traktować dwojako. Może to być błąd operatora odpowiedzialnego za umocowanie elementu lub informacja, że w trakcie pracy ta część ulega obluzowaniu. W każdym przypadku należy wyciągnąć wnioski aby w przyszłości nie dochodziło do takich sytuacji. Przykład podobnych zdarzeń pokazano w tabeli 3.10.

Tabela 3.10. Przykład mikro–przestojów zarejestrowanych przez operatorów przedsiębiorstwa. (*Źródło: opracowanie własne*)

Miejsce wystąpienia przestoju	Opis zdarzenia	Czas postoju [min]
Wiertarka	Brak zasilania na drugiej wiertarce	7,66
Frezarko– czopiarka	Awaria krańcówki	9,08
Frezarko– czopiarka	Zatkany wyciąg	1,01
Odbiornik	Reset oprogramowania	4,04

W oparciu o powyższą interpretację awarii i mikro–awarii, wykonano analizę porównawczą do przeprowadzonych obliczeń i zestawionych w tabeli 3.6. z wykorzystaniem stosowanych przez przedsiębiorstwo wskaźników efektywności maszyn i urządzeń. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.11.

Tabela 3.11. Wartości wskaźników MTTR, MTTF, MTBF za okres jednego roku dla wybranego centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie założeń z tabeli 3.6*)

Miesiąc	styczeń	luty	marzec		październik	listopad	Grudzień	średnia/ mies.
Poziom techniczny								
czas [min]	1835	2238	1609		1250	1535	2211	**1459**
liczba [szt.]	37	42	43		26	57	54	**37**
MTTR [min]	50	53	37	…	48	27	41	**40**
MTTF [min]	1079	907	1001		1669	680	599	**1106**
MTBF [min]	1129	960	1038		1717	707	640	**1146**
Poziom prewencyjny								
czas [min]	6742	5056	6757		5996	6097	4152	**5617**
liczba [szt.]	230	232	258		216	242	167	**214**
MTTR [min]	29	22	26	…	28	25	25	**26**
MTTF [min]	152	152	147		179	141	182	**162**
MTBF [min]	182	174	173		207	167	207	**188**
Poziom zarządzania								
czas [min]	16556	12490	13375		15300	13174	19556	**17075**
liczba [szt.]	209	207	176	…	187	174	152	**171**
MTTR [min]	79	60	76		82	76	129	**106**

MTTF [min]	121	134	178		157	156	99	**129**
MTBF [min]	200	195	254		239	232	227	**235**
Poziom informacyjny								
czas [min]	319	309	188		376	375	326	**279**
liczba [szt.]	66	65	37		77	97	74	**60**
MTTR [min]	5	5	5	...	5	4	4	**5**
MTTF [min]	628	616	1201		575	412	463	**710**
MTBF [min]	633	620	1206		580	416	467	**715**

Porównując wartości liczbowe z tabeli 3.6. z uzyskanymi wynikami zestawionymi w tabeli 3.11, nie zmieniono czasu i częstości występowania postoju w wyniku planowych działań konserwacyjnych wykonywanych przez SUR , mających na celu wydłużenie czasu eksploatacji systemu technicznego. Również nie dokonano zmian w obliczeniach odnoszących się do metod zarządczych. Natomiast „mikro–awarie" opisane z poziomu informacyjnego trwają średnio 5 minut, co jest zgodne przyjętym w rozprawie założeniem. Również czas rozpatrywany z poziomu technicznego, wydłużył się ze średniej wartości za jeden rok eksploatacji z 184 minuty do 1106 minut (czas pozostawania w stanie zdatności). Czas naprawy wynosił średnio 40 minut. Zarówno czas poprawnej pracy systemu, jak i czas jego odnowy utwierdza autora w przekonaniu, że zarówno pierwsza jak i druga wartość jest prawdopodobna.

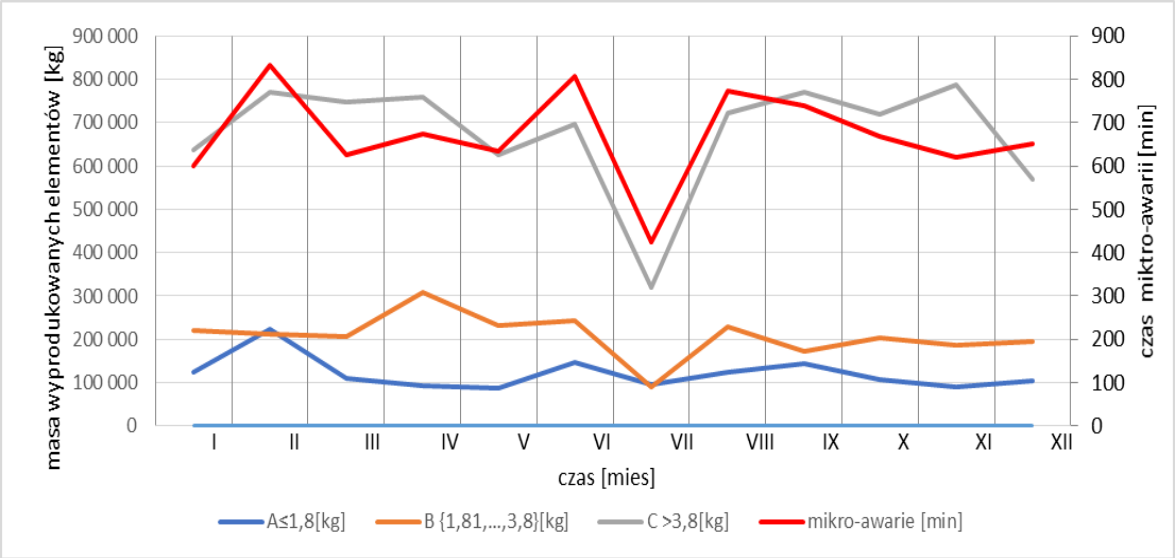
3.3.5 Wpływ masy produkowanych elementów na występowanie mikro–awarii

Wiedza o przyczynach mających wpływ na występowanie stanów niezdatności maszyn wchodzących w skład złożonych systemów technicznych może wspomóc przedsiębiorstwa w poszukiwaniu koncepcji mającej na celu ograniczanie strat związanych z awaryjnością własnych parków maszynowych, a co za tym idzie, podniesie efektywności w realizacji planów produkcyjnych. Prewencja wspomaga wydłużenie cyklu życia maszyn, jednak nie jest możliwe, aby awarie nie zdarzały się wcale. Mimo wszelkich starań związanych z właściwym doborem podejmowanych działań prewencyjnych, produkcja zmuszona jest realizować zamówienia w nieplanowanym czasie pracy pracowników. Wobec pozyskanych danych historycznych wszystkich przestojów, wybrano zdarzenia techniczne trwające krócej niż 10 minut oraz przeprowadzono ich analizę. Postawiono pytanie, na ile można przewidzieć mikro-przestoje złożonego systemu technicznego i czy przy stałym obciążeniu centrum obróbczego można zauważyć ich powtarzalność.

Korzystając z pozyskanych danych statystycznych o liczbie produkowanych elementów oraz ich masie jednostkowej, przeprowadzono analizę czasu mikro–przestojów na jednym z centrum obróbczym. W celu uściślenia założeń, przyjęto następujące trzy przedziały mas (kg):

- elementy grupy $A \leq 1,8$[kg];
- elementy grupy B {1,81, ... ,3,8}[kg];
- elementy grupy $C > 3,8$[kg].

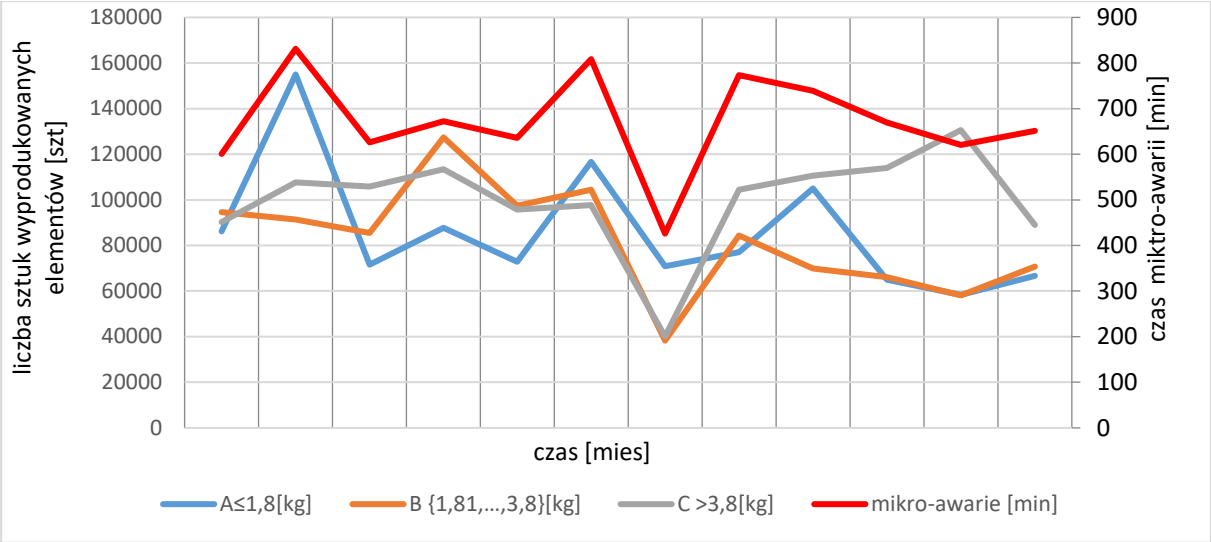
Następnie przeliczając liczbę występujących mikro–przestojów (poziom informacyjny) w odpowiednich grupach wagowych oraz po obliczeniu ich całkowitej masy i przeskalowując wartości czasów przestojów tak, aby wykresy można było porównać, zauważono związek między występowaniem mikro–przestojów, a udziałem elementów z grupy C (rys.3.14.)



Rysunek 3.14. Występowanie mikro–awarii w wyniku masy produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*)

Na rysunku (3.14.) przedstawiono zależności masy wyprodukowanych elementów oraz łączny czas mikro–awarii w rozpatrywanych miesiącach produkcji. Można stwierdzić, że największy wpływ na występujące mikro–awarie miały elementy o masie jednostkowej równej lub powyżej 3,8 kg. Z rozpatrywanych danych wynika, że grupa elementów typu *C* stanowiła ok 33% wszystkich wyrobów wyprodukowanych na opisywanym centrum obróbczym. Ponadto można zauważyć podobieństwo w przebiegu zależności wyprodukowanej masy elementów grupy C z łącznym czasem wystąpienia mikro–awarii.

W porównywalny sposób, dokonano oceny wpływu produkowanych elementów na wystąpienie mikro–przestojów pod kątem liczby sztuk przypadających na każdą grupę wagową (A, B, C; rys. 3.14).Na rysunku 3.15., pokazano otrzymane wyniki.



Rysunek 3.15. Występowanie mikro–awarii w wyniku liczby produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*)

Na powyższym rysunku (3.15.), lewa strona osi wskazuje całkowitą liczbę wyprodukowanych sztuk w założonych przedziałach mas jednostkowych (grupa A, B, C). Pozostałe założenia zostały zachowane w stosunku do otrzymanych wyników pokazanych na rysunku 3.14.

Z wykresu wynika, że nie występuje żadna zależność mogąca mieć bezpośredni wpływ na występowanie mikro–awarii w wyniku liczby produkowanych elementów. Wynika to asortymentu produkowanych elementów na centrum obróbczym. W rozpatrywanym okresie czasu obliczono, że na linii produkcyjnej było przetwarzane 87 elementów o różnym kształcie i masie.

Poszukiwanie zależności pomiędzy występowaniem awarii spowodowanych obciążeniem w wyniku masy produkowanych elementów, może w przyszłości wygenerować nową koncepcję sporządzania planów produkcyjnych. Harmonogram realizacji zadań mógłby być opracowywany nie w oparciu o liczbę produkowanych sztuk, ale o jednostkową masę. Na przedstawionych rysunkach wykazano, że zachodzi związek pomiędzy pewną grupą mas produkowanych elementów, a czasem przestoju w wyniku mikro–awarii. Taka informacja może być również cenna dla konstruktorów niniejszych systemów technicznych, poprzez poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, powodujących zwiększenie wytrzymałości stosowanych materiałów do budowy obiektów technicznych, co w ostateczności może wpłynąć na zmniejszenie liczby występujących awarii w przedsiębiorstwie.

3.4 Wnioski z badań wstępnych

Podział awarii na dwie oddzielne kategorie (poziom techniczny i informacyjny), umożliwił autorowi opracować założenia teoretyczne do budowy modelu matematycznego z wykorzystaniem procesów semi–Markowa, opisującego proces odnowy, generowanego przez czasy powrotu procesu SM do danego stanu dla centrów obróbczych stosowanych w przemyśle meblarskim (rozdział 4).

W rozdziale trzecim zostały omówione:

- awarie trwające powyżej 9,99 minuty, rozpatrywane z poziomu technicznego;
- planowe przestoje obsługowe, opisane z poziomu prewencyjnego;
- przestoje spowodowane metodą sterowania przedsiębiorstwem (poziom zarządzania);
- mikro–przestoje, dotychczas analizowane z poziomu awarii technicznych.

W pracy opisano całkowity czas występujących awarii trwających do dziesięciu minut w rozpatrywanym okresie czasu pracy centrum obróbczego i zestawiono z dotychczas stosowanym modelem oceny (na podstawie danych zestawionych w tab. 3.6). W pracy założono, że awaria złożonego systemu technicznego nie może trwać 8 minut oraz, że czas poprawnej pracy centrum obróbczego jest dłuższy niż uzyskana średnia wynosząca 184 minuty (tab. 3.11.).

W tabeli 3.10. pokazano, że czas mikro–awarii może być interpretowany jako informacje i czynności „uciążliwe" dla pracowników obsługujących centrum obróbcze, jednocześnie nie wymagając ingerencji Służb Utrzymania Ruchu.

Zestawione dane porównawcze przedstawione na rysunkach 3.14. i 3.15. wskazują, że istnieje związek występowania awarii w oparciu o produkowaną masę elementu.

Przeprowadzona analiza OEE (na podstawie danych zebranych w tab. 3.5), wskazała wyraźne podobieństwo efektywności eksploatacyjnej dla czterech centrów obróbczych, co oznacza, że metody sterowania procesem wytwórczym (zarządzanie przedsiębiorstwem), rodzaj podejmowanych działań prewencyjnych przez Służby Utrzymania Ruchu, oraz rodziny produkowanych elementów, wzajemnie się uzupełniają. Choć wskaźnik OEE nie wskazuje konkretnej przyczyny przestoju, a wynik pomiaru stanowi średnią, to okazał się wystarczający do prowadzenia wstępnej analizy doboru obiektu badań. Dzięki uzyskanym wynikom uznano, że pozostałe trzy centra obróbcze są eksploatowane w jednakowy sposób.

Wobec powyższych wniosków, dalsza część rozprawy jest próbą wskazania prawdopodobieństwa występowania awarii elementów systemu technicznego przy wykorzystaniu modelu matematycznego. Zastosowanie teorii procesów semi–Markowa do opisu niezawodności złożonych systemów technicznych w przemyśle meblarskim (uzasadnienie zawarto w rozdz. 2)

pozwala wyróżnić podstawowe elementy systemu, którymi są maszyny połączone ze sobą za pomocą transporterów w całość (rys. 3.4.), oraz dokonać oceny czasów przebywania obiektu technicznego w określonych stanach.

Zakres otrzymanych danych statystycznych z przedsiębiorstw produkcyjnych, pozwala przyjąć założenie, że do opisu funkcjonowania centów obróbczych, nie pominięto żadnych informacji, które mogłyby wpłynąć na uzyskane wyniki badań. Dodatkowo kilkunastoletnie doświadczenie, zarówno w obsłudze jak i zarządzaniu takimi systemami, pozwala na przeprowadzenie szczegółowej oceny efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych.

4 MODEL OCENY EFEKTYWNOŚCI ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

W rozdziale przeprowadzono identyfikację awarii technicznych trwającą powyżej 10 minut. Przyjęto założenie, że względu na naprzemienne i przypadkowe występowanie stanów zdatności i niezdatności, możliwe jest przeprowadzenie oceny awaryjności elementów systemu technicznego pod kątem rozkładu wykładniczego (rozdz.2.1.2., s.31), którego cechą jest „brak pamięci". Stan zdatności jest stanem wykonywania zleconych zadań, a tym samym jest to stan gotowości, w którym system oczekuje na zadanie. Stan przeciwny to awaria, kiedy centrum obróbcze nie może realizować swoich funkcji z powodu uszkodzenia choć jednego z elementów systemu.

4.1 Określenie przedziałów czasów zdatności do wystąpienia odnowy systemu

W pracy za populację generalną przyjęto zbiór wszystkich zdarzeń powodujących zatrzymanie złożonego systemu technicznego w jednym z zakładów produkujących meble z płyty z klejonki sosnowej. Za ostateczną próbę badawczą wybrano jedno centrum obróbcze przeznaczone do produkcji mebli i dokonano analizy wszystkich występujących na nim zdarzeń w stosunku do liczby produkowanych elementów za okres dwóch lat. Wybrane centrum obróbcze realizuje proces produkcyjny przy stałym środowisku pracy (np.: w halach produkcyjnych utrzymuje się stałą temperaturę i wilgotność powietrza, jednolity materiał poddawany obróbce, wieloasortymentowa gama elementów, czynności serwisowe wykonywane regularnie przez operatora oraz służby utrzymania ruchu).

Wykorzystując teorię przeznaczoną do matematycznego modelowania procesu efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych, dotyczącą procesów semi–Markowa, przyjęto następujące założenia:

1. Badany system techniczny charakteryzuje szeregowa struktura niezawodności, składającą się z 6 elementów przedstawionych na rys 3.4 (frezarko-czopiarka, obrotnica/obracak, odbiornik/RBO, podajnik, transporter, wiertarka).
2. Zakłada się, że czas zdatności każdego elementu jest nieujemną zmienną losową o rozkładzie wykładniczym, określonym przez funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Ze struktury niezawodnościowej systemu wynika, że jest on zdatny wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie jego elementy są w stanie zdatności, tzn. uszkodzenie użytkowanego systemu następuje w chwili uszkodzenia jakiegokolwiek elementu;

3. Uszkodzone elementy są odnawialne. Własność wynikająca z rozkładu wykładniczego, charakteryzuje się tym, że system nie pamięta zdarzeń przeszłych . Dowodzi to, że odnowa (wymiana) elementu jest jednocześnie odnową systemu;
4. W badaniu przyjęto dane o zdarzeniach za okres 2 lat, od 01.01.2016 r. do 24.12.2017 r. Czasy postoju uwzględniają wszystkie przestoje mające miejsce na centrum obróbczym.
5. W badaniu przyjęto dane o produkowanych elementach w okresie 2 lat, od 01.01.2016 r. do 24.12.2017r. W oparciu o dane wyznaczono czasy ich wyprodukowania oraz indywidualną masę elementu;
6. Założono opracowanie modelu teoretycznego, który uwzgkędni wszelkie założenia badawcze (rozdz. 4.2);
7. Założono w modelu, że przestoje zarówno prewencyjne jak i zarządcze, świadczą o stanie zdatności systemu, tzn., że w ich wyniku nie doszło do awarii technicznej;
8. W przyjętym modelu pominięto czasy krótsze niż 10 minut zakładające, że są to zdarzenia nie wymagające ingerencji SUR.

W pierwszym etapie badań dokonano zapisu danych opisujących gamę produkowanych elementów na opisanym centrum obróbczym. Przykład pozyskanych danych przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zapis realizacji planu w systemie.
(*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstwa*)

numer zlecenia	**element**	**linia**	**data**	**Wyprodukowano [szt.]**	**Odpad [szt.]**	**powierzchnia wyprodukowanych elementów [m^2]**
1/20170102	A	3	20170102	2	2	0,48
2/20170102	A	3	20170102	688	0	166,68
3/20170102	A	3	20170102	4 858	0	1 176,97
5/20170109	S	3	20170109	58	58	44,18
14/20170109	S	3	20170109	23	23	17,52
20/20170109	S	3	20170109	2 405	0	1 831,94
8/20170111	B	3	20170111	40	0	16,08
12/20170120	S	3	20170120	16	16	12,19
13/20170120	K	3	20170120	4	4	3,05
21/20170120	K	3	20170120	2	2	1,52

Informacje zawarte w tabeli 4.1 w pierwszej kolumnie pokazują numer zlecenia produkcyjnego. Na tej podstawie operator jest informowany, jaki materiał musi pobrać z magazynu surowca. Numer zlecenia pozwala śledzić cały proces technologiczny, ponieważ zamknięcie zlecenia ma miejsce dopiero na wydziale pakowania. Natomiast ze względu na poufność danych, produkowanym wyrobom przypisano litery alfabetu. W kolumnie „wyprodukowano" zamieszczono informację o liczbie sztuk, które zostały wyprodukowane i przeszły do dalszego etapu procesu technologicznego lub zostały odłożone w wyniku wykorzystania do ustawień parametrów maszyn. Produkowane elementy na centrum obróbczym, opisane są w systemie jako m^2, ponieważ posiadają dwa wymiary: długość i szerokość. W taki sposób analizowana jest efektywność zarówno realizacji planu w wyniku kalkulacji opartej o prędkości posuwu centrum, jak i zużywanie się narzędzi przeznaczonych do obróbki produkowanych wyrobów.

Łącznie z uzyskanych danych dla przykładowego centrum obróbczego za okres dwóch lat uzyskano 6.322 zapisów z realizacji planu produkcyjnego, czyli 46.128 m^3 produkowanej płyty z klejonki sosnowej o całkowitej masie 11.940 ton.

Kolejnym etapem badawczym było właściwe zestawienie wszelkich zdarzeń powodujących zatrzymanie centrum obróbczego. Przykład zawartych informacji o przestojach pokazano w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Raport czasów przestojów centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Data	**kod awarii**	**miejsce awarii lub jej przyczyna**	**zmiana**	**czas postoju [min]**
20170129	521	Wiertarka	3	11
20170130	100	nie planowany czas pracy	2	480
20170130	521	Wiertarka	3	32
20170130	412	dostrajanie podczas produkcji	1	7
20170130	410	ustawienie maszyny	2	23
20170130	420	przerwa	3	30
20170130	450	konserwacja SUR	1	449
20170130	460	sprzątanie	3	12
20170130	505	odbiornik	3	38
20170130	490	niezdefiniowane	3	4

Sumaryczna liczba danych opisujących przestoje za okres dwóch lat wynosiła 6005 zdarzeń powodujących zatrzymanie centrum obróbczego, a całkowity czas postoju w przybliżeniu

wynosił 200 pełnych dni. Z pozyskanych danych również wynika, że plan produkcji pomija główne święta państwowe, co również zostało ujęte w założeniach badawczych. Natomiast dla przykładu, jeśli odnotowano kod „nieplanowany czas pracy"– co oznacza, że nie planowano żadnych zleceń dotyczących wykonania planu produkcyjnego na centrum obróbczym w danej chwili, to autor pracy zaklasyfikował ten czas jako stan gotowości do realizacji produkcji, a tym samym przyjęto, ze obiekt techniczny pozostaje w stanie zdatności. W kolejnym etapie badań zestawiono dane odnoszące się do liczby produkowanych elementów, uwzględniając ich indywidualną masę oraz czas wykonania zależny od wielkości elementu i stopnia skomplikowania, z informacją o przestojach technicznych (awariach) trwających poniżej i powyżej 10 minut. Przykład pokazano w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Zapis czasów awarii oraz dopasowanie do produkowanych elementów.
(*Źródło: opracowanie własne*)

data	**element**	**wyprodukowano [szt.]**	**odpad [szt.]**	**powierzchnia wyprodukowanych elementów [m2]**	**masa [kg]**	**zmiana**	**miejsce awarii**	**masa całkowita elementów [kg]**	**czas awarii [min]**
20160108	W	850		253,83	2,83	1		2402	
20160108	I	8	8	5,81	8,38	2	wiertarka	67	6,30
20160108	I	1 240		900,65	8,38	2	wiertarka	10397	19,53
20160108	K	2	2	0,37	1,75	2	frezarko - czopiarka	3	33,05
20160108	K	2 357		435,72	1,75	2		4124	
20160108	L	730		390,78	6,12	2	wiertarka	4470	277,92
20160108	M	3	3	0,90	2,83	3		8	
20160108	M	6	6	1,79	2,83	3		17	
20160108	M	1 222		364,92	2,83	3		3454	
20160108	M	3	3	0,90	2,83	3		8	
20160108	M	247		73,76	2,83	3	podajnik	698	21,03

Spośród wszystkich awarii wyselekcjonowano techniczne, w celu opracowania założeń modelu semi–Markowa, czyli czasu awarii trwającej powyżej 10 minut.

Tabela 4.4. Przykład sumarycznego zestawienia czasów i liczby awarii występującej każdego dnia. (*Źródło: opracowanie własne*)

Data		20160108	20160124	20160125	20160126	20160128	20160129	20160202	20160203	20160204	20160206	20160207	20160211	20160214	20160223	20171206	20171207	20171214	20171215	20171220	20171221	**Razem**
wybrane czasy awarii [min]	0,95																					357
	1,75	34												14					101			962
	1,78								88		47	136				135		46	151			1438
	1,83																					12
	1,83				60			42														267
	2,35																					1009
	2,83	21	238	29																		1462
	3,81																					1025
	4,66																					130
	6,12	278						112						74	62							5310
	6,69						139			42												948
	7,25					97							44								226	612
	7,93												14			14		53				1081
	8,31																					815
	8,38	20	120																			1486
	9,07										170				61		150			120		4491
	11,57																					494
liczba występujących awarii [szt.]	0,95																					4
	1,75	1												1					1			16
	1,78								1		1	1				2		1	3			37
	1,83																					1
	1,83				2			1														7
	2,35																					20
	2,83	1	2	1																		36
	3,81																					17
	4,66																					4
	6,12	1						1						2	2							101
	6,69						1			1												14
	6,73																					0
	7,25					3							1								1	11
	7,93												1			1		1				37
	8,38	1	2																			42
	9,07										1				1		2			1		79
	11,57																					5
liczba awarii		**4**	**4**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**	**4**	**4**	**3**	

W zestawionych danych uwzględniono indywidualną masę elementu celem zbadania wpływu zależność masy do występowania stanów niezdatności. W celu poprawnego opraco-

wania założeń, wyznaczono indywidualne czasy obróbki każdego różniącego się masą elementu. Dzięki wzorom stosowanym w analizie oraz przy pomocy oprogramowania Excel dokonano rejestracji wszystkich zdarzeń określonych jako stan niezdatności centrum obróbczego (tab. 4.4).

Połączone w ten sposób dane pozwoliły uzyskać informacje o liczbie awarii technicznych w każdym dniu pracy przedsiębiorstwa. W oparciu o normy obliczone przez wydział R&D dla produkowanych elementów, wyselekcjonowano jednostkowe czasy do zatrzymania centrum obróbczego. Przykład wybranych danych w pierwszej części tabeli 4.4 pokazuje sumaryczny czas awarii na dobę, a druga cześć, liczbę takich przypadków oraz całkowitą sumę. Wybrano tylko jednostkowe przypadki i w tabeli pominięto dni, w których nie występowała awaria. Zestawione dane w powyższej tabeli informują o całkowitym czasie przebywania systemu technicznego w stanie niezdatności oraz liczbę występujących przypadków w stosunku do produkowanej masy elementu.

Powyższy sposób analizy danych umożliwił uzyskanie 696 informacji o czasach zdatności systemu technicznego do realizacji zadań oraz 695 informacji o czasach niezdatności, czyli braku możliwości realizacji funkcji do których zostało przeznaczone centrum obróbcze.

W kolejnym etapie zawarto analizę jednostkową indywidualnego obciążenia produkowanymi elementami w chwili wystąpienia awarii oraz jej miejsce (tab. 4.5).

Interpretacja danych z obserwacji (tab. 4.5) wskazuje chwile do osiągnięcia stanu niezdatności. Zestawienie należy interpretować jako każdorazowe następstwo występujących zdarzeń, czyli czas zdatności, kiedy system techniczny z założenia był dostępny, a następnie przejście do stanu niezdatności w wyniku jego uszkodzenia. Wskazano także obszary, w których doszło do awarii oraz jednostkową masę produkowanego elementu w chwili wystąpienia niezdatności systemu technicznego. Tak opracowane dane pozwoliły przejść do kolejnego etapu badań, w celu opracowania semi–markowskiego modelu badawczego.

Tabela 4.5. Występowanie naprzemiennie stanów zdatności i niezdatności złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Lp.	stan zdatności [min]	stan niezdatności [min]	miejsce awarii	masa [kg]	Lp.	stan zdatności [min]	stan niezdatności [min]	miejsce awarii	masa [kg]
1	480,00	19,53	wiertarka	8,385	510	945,87	25,24	wiertarka	3,470
2	73,47	33,05	frezarko-czopiarka	1,750	511	0,76	11,12	odbiornik/RBO	3,470
3	22,95	277,92	frezarko-czopiarka	6,124	512	1403,88	83,83	frezarko-czopiarka	9,072
4	96,08	21,03	frezarko-czopiarka	2,826	513	1005,17	357,00	wiertarka	9,072
5	6254,97	13,62	podajnik	3,806	514	485,00	62,73	odbiornik/RBO	2,708
6	2002,38	60,00	wiertarka	6,124	515	2960,27	12,12	wiertarka	6,689
7	1420,00	136,00	wiertarka	9,072	600	1464,85	17,17	frezarko-czopiarka	4,202
8	9459,00	73,28	wiertarka	6,124	601	4086,83	23,26	wiertarka	4,932
9	1976,72	125,30	frezarko-czopiarka	8,385	602	1416,74	30,14	podajnik	4,932
10	974,70	153,33	frezarko-czopiarka	2,826	603	929,86	25,35	podajnik	6,124
11	0,00	84,83	podajnik	2,826	604	0,00	30,30	podajnik	6,124
12	241,83	120,00	frezarko-czopiarka	8,385	605	904,35	26,27	odbiornik/RBO	2,826
13	480,00	29,10	frezarko-czopiarka	2,826	606	140,73	12,13	odbiornik/RBO	8,385
14	960,00	60,00	podajnik	1,835	607	0,00	14,14	frezarko-czopiarka	8,385
15	1380,00	16,88	frezarko-czopiarka	2,354	608	766,73	174,37	podajnik	9,072
100	3837,95	45,13	odbiornik/RBO	6,689	609	785,63	81,00	wiertarka	1,750
101	465,87	31,35	odbiornik/RBO	4,724	610	400,00	17,05	odbiornik/RBO	6,124
102	978,65	31,85	odbiornik/RBO	9,072	611	1421,95	20,21	transporter	6,124
103	4268,15	25,82	podajnik	2,354	612	32,79	11,12	transporter	6,124
104	279,18	11,11	transporter	2,354	613	3775,88	67,72	wiertarka	2,890
110	1193,98	13,05	frezarko-czopiarka	6,124	680	328,94	46,32	frezarko-czopiarka	1,776
111	1180,95	11,12	podajnik	7,928	681	913,68	53,26	podajnik	7,928
112	0,00	50,10	frezarko-czopiarka	7,928	682	426,74	50,02	frezarko-czopiarka	1,776
113	418,78	17,00	frezarko-czopiarka	7,928	683	0,00	26,28	wiertarka	1,776
114	1525,00	84,98	wiertarka	4,724	684	0,00	75,00	wiertarka	1,776
115	2371,02	11,15	frezarko-czopiarka	6,124	685	808,70	101,19	frezarko-czopiarka	1,750
200	900,85	58,23	wiertarka	6,124	691	60,94	120,00	frezarko-czopiarka	9,072
201	421,77	35,40	frezarko-czopiarka	6,124	692	273,96	225,74	frezarko-czopiarka	7,249
202	444,60	57,18	wiertarka	6,124	693	252,26	29,25	wiertarka	4,202
203	902,82	22,18	frezarko-czopiarka	1,750	694	79,75	55,64	odbiornik/RBO	4,684
204	1022,82	15,20	podajnik	4,603	695	798,36	10,10	wiertarka	4,684
205	955,80	10,67	odbiornik/RBO	1,737	696	1426,90			

4.2 Procesy semi–Markowa jako podstawa do konstrukcji modelu

W pracy przyjęto, że semi–Markowski model opisany zostanie przez rozkład wykładniczy (2.15.) dla czasów jego zdatności oraz przez dowolny rozkład dla czasów odnowy. System będzie się składał z *n* elementów, a czas zdatności elementu o numerze *k* będzie nieujemną zmienną losową $\zeta_k : f_k(t),\ t \geq 0$, opisaną przez gęstość rozkładu czasu pracy systemu technicznego do chwili wystąpienia awarii w trakcie krotnej (k–tej) operacji.

Struktura szeregowa (rys. 2.6.) w niezawodności opisuje właściwość systemu technicznego w którym uszkodzenie jednego elementu powoduje uszkodzenie całego systemu technicznego, a uszkodzony element jest odnawialny. Rozkład czasu odnowy systemu po awarii k–tej operacji jest określony przez dystrybuantę która jest nieujemną zmienną losową $\gamma_k : G_k(t),\ t \geq 0$ oraz opisana wzorem (Grabski, 2017):

$$G_k(t) = P\{\gamma_k \leq t\} \tag{4.1}$$

gdzie:

γ_k – czas naprawy po awarii k–tej elementu operacji.

Założono, że zmienne losowe są niezależne. Oznacza to, że kolejne czasy zdatności ζ_k i niezdatności γ_k jego elementów są kopiami zmiennych losowych odpowiednio $\zeta_1, \zeta_2, ..., \zeta_N$ oraz $\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_N$. Z przyjętego rozkładu wynika, że odnowa elementu jest jednocześnie odnową całego systemu technicznego, a zmienne $\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_N$ mają dodatnie wartości oczekiwane i skończone dodatnie wariancje (Grabski, 2017).

Przyjęto następujące stany centrum obróbczego:

- *N+1* – praca zdatnego systemu;
- *k, k=1,...,N* – odnowa systemu po awarii w trakcie k–tej operacji.

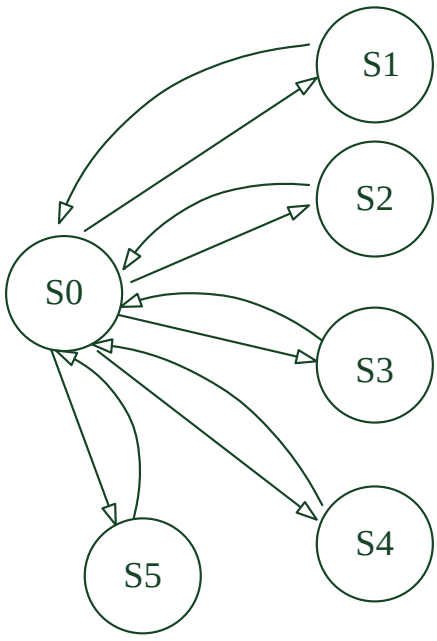
Modelem niezawodnościowym opisującym funkcjonowanie systemu technicznego będzie proces semi–Markowa o zbiorze stanów S={*1,2,...,N,N+1*}. Podzbiory opisano następująco:

- $S_N = \{1, 2, ..., N\}$ – podzbiór stanów niezdatności;
- $S_0 = \{N+1\}$ – jednoelementowy podzbiór stanów zdatności.

Chwile, w których następuje zmiana stanu systemu $0 = \tau_0 < \tau_1 < ... < \tau_n$ będą oznaczać chwile awarii systemu technicznego lub momenty, w których rozpoczyna się użytkowanie systemu technicznego uznanego za zdatny. Oznacza to, że stan systemu technicznego w momencie τ_{n+1} oraz czas trwania stanu osiągniętego w chwili τ_n nie będzie zależał od stanów i czasów ich trwania przyjętych w chwilach $\tau_0, \tau_1, ..., \tau_{n-1}$. Przyjęto pięć stanów niezdatności oraz jeden stan zdatności.

- S_0 : stan zdatności (w modelu teoretycznym stan N+1);
- S_1 : stan niezdatności frezarko–czopiarki;
- S_2 : stan niezdatności odbiornika/RBO,
- S_3 : stan niezdatności podajnika;
- S_4 : stan niezdatności transportera;
- S_5 : stan niezdatności wiertarki

Graf możliwych zmian stanów systemu technicznego przedstawiono na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Graf zmian stanów procesów. (*Źródło: opracowanie własne*)

Z postaci grafu opisującego funkcjonowanie złożonego systemu technicznego wynika postać jądra procesu:

$$Q(t)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{1N+1}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{2N+1}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{3N+1}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{4N+1}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{5N+1}(t) \\ Q_{1N+1}(t) & Q_{2N+1}(t) & Q_{3N+1}(t) & Q_{4N+1}(t) & Q_{5N+1}(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ N+1 \end{matrix}$$

W celu zbudowania modelu, należy określić wszystkie elementy procesu semi–Markowa. Zgodnie z przedstawioną macierzą, zmiana stanu *N+1* na *k* (*k*=1,2,3,4,5) w czasie nie większym niż *t* nastąpi, jeśli zajdzie następująca zależność (Grabski, 2017):

$$\{0 \le \zeta_k \le t, \zeta_i > \zeta_k, i = 1,2,...,k-1,k+1,N\} \tag{4.2}$$

gdzie:

ζ_k – czas zdatności k–tej operacji;

γ_k – czas naprawy po awarii k–tej operacji.

Wykorzystując niezależność czasów zbudowano całkę:

$$\int_D f_1(dt_1) f_2(dt_2) f_3(dt_3) f_4(dt_4) f_5(dt_5) \tag{4.3}$$

Dopasowując równanie całkowe do rozkładu wykładniczego otrzymano:

$$\int_D \lambda_1 e^{-\lambda t_1} \lambda_2 e^{-\lambda t_2} \lambda_3 e^{-\lambda t_3} \lambda_4 e^{-\lambda t_4} \lambda_5 e^{-\lambda t_5} dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 dt_5 \tag{4.4}$$

gdzie $D = \{(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5) : \tau_1 \le t, \tau_2 > \tau_1, ...\}$.

Zamieniając całkę po zbierze D na całkę iterowana, otrzymano (Grabski, 2017):

$$Q_{kN+1}(t) = \frac{\lambda_k}{\Lambda}(1 - e^{-\Lambda t}), \qquad \Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5, \; t \ge 0 \tag{4.5}$$

Zmiana stanu niezdatności *k* na stan zdatności *N*+1 w czasie nie większym niż *t*, będzie miała miejsce jeśli zajdzie własność $\gamma \le t$. Postać prawdopodobieństwa dla jądra procesu opisano:

$$Q_{kN+1}(t) = P\{\gamma_k \le t\} = G_k(t) \tag{4.6}$$

Ostateczna postać jądra procesu przyjmie postać macierzy:

$$Q(t)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_1(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_3(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_4(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_5(t) \\ \frac{\lambda_1}{\Lambda}(1-e^{-\Lambda t}) & \frac{\lambda_2}{\Lambda}(1-e^{-\Lambda t}) & \frac{\lambda_3}{\Lambda}(1-e^{-\Lambda t}) & \frac{\lambda_4}{\Lambda}(1-e^{-\Lambda t}) & \frac{\lambda_5}{\Lambda}(1-e^{-\Lambda t}) & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ N+1 \end{matrix}$$

W celu uproszczenia modelu przyjęto następującą zależność:

$$P\{X(0)=N+1\}=1 \tag{4.7}$$

Obliczając granicę przy $t\to\infty$ otrzymano macierz prawdopodobieństw przejść włożonego łańcucha Markowa w proces semi–Markowa. Zmienne losowe w ostatnim wierszu macierzy zakładają czas zdatnej pracy systemu.

$$P=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\lambda_1}{\Lambda} & \frac{\lambda_2}{\Lambda} & \frac{\lambda_3}{\Lambda} & \frac{\lambda_4}{\Lambda} & \frac{\lambda_5}{\Lambda} & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ N+1 \end{matrix}$$

Z macierzy wynika, że czas zdatności systemu ma rozkład wykładniczy z parametrami $\Lambda=\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5$. Oczekiwany czas zdatności zostanie wyznaczony w oparciu o założenie (Grabski, 2017):

$$E(T_6)=\frac{1}{\Lambda} \tag{4.8}$$

W celu obliczenia oczekiwanego czasu powrotu do stanu zdatności zostaną wykorzystane następujące wzory (Grabski, 2017):

$$E(\Theta_{66})=\frac{1+\lambda_1E(\gamma_1)+\lambda_2E(\gamma_2)+\lambda_3E(\gamma_3)+\lambda_4E(\gamma_4)+\lambda_5E(\gamma_5)}{\Lambda} \tag{4.9}$$

$$E(\Theta^2{}_{66}) = \frac{2}{\Lambda^2}[1+\lambda_1 E(\gamma_1)+\lambda_2 E(\gamma_2)+\lambda_3 E(\gamma_3)+\lambda_4 E(\gamma_4)+\lambda_5 E(\gamma_5)]+ \\ \frac{1}{\Lambda}[\lambda_1 E(\gamma^2{}_1)+\lambda_2 E(\gamma^2{}_2)+\lambda_3 E(\gamma^2{}_3)+\lambda_4 E(\gamma^2{}_4)+\lambda_5 E(\gamma^2{}_5)] \tag{4.10}$$

Po obliczeniu momentu pierwszego i drugiego rzędu (4.11. i 4.12.) zostanie obliczona wariancja:

$$D(\Theta_{66}) = \sqrt{E(\Theta^2{}_{66}) - [E(\Theta_{66})]^2} \tag{4.11}$$

Wartość oczekiwana i odchylenie standardowe zostaną obliczone w oparciu o następującą formułę:

$$m(t) = \frac{t}{E(\Theta_{66})} \tag{4.12}$$

$$\sigma(t) = \frac{D(\Theta_{66})}{E(\Theta_{66})}\sqrt{\frac{t}{(\Theta_{66})}} \tag{4.13}$$

W oparciu o powyższe wzory, zbudowano teoretyczny model procesu eksploatacji centrum obróbczego o strukturze szeregowej w opisywanej baraży meblarskiej.

4.3 Charakterystyki niezawodnościowe modelu

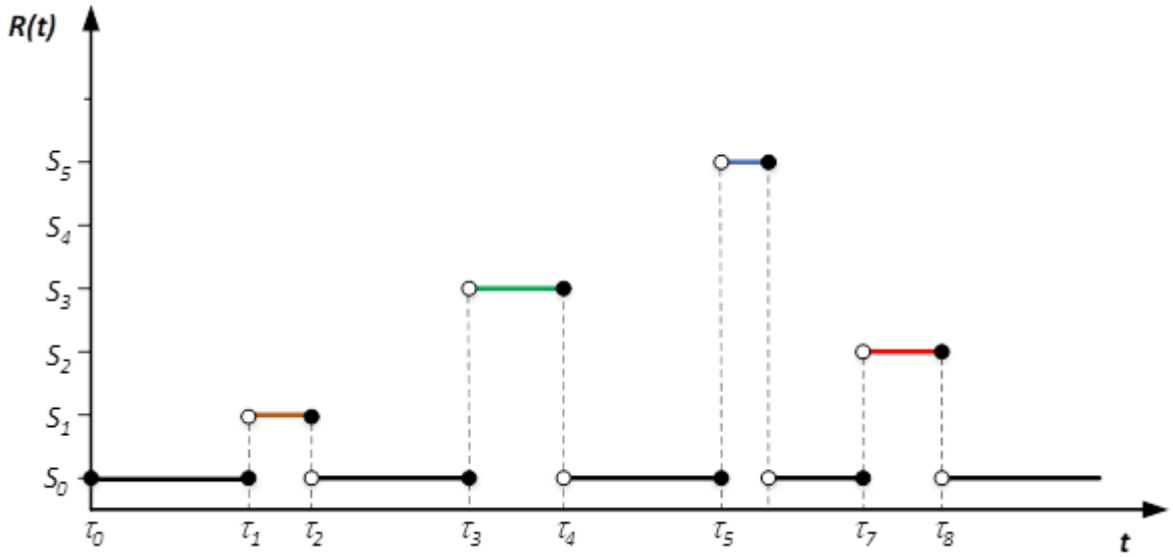
Na podstawie opracowanych danych z rozpatrywanego zakresu czasów eksploatacji badanego systemu technicznego, dla poszczególnych jego elementów, dokonano określenia okresów czasu ich zdatności oraz liczby awarii. Dla poszczególnych elementów systemu otrzymano następujące wyniki (tab. 4.6):

Tabela 4.6. Liczba występujących awarii dla poszczególnych elementów złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Element systemu technicznego	Liczba awarii [szt.]
frezarko-czopiarka	192
Obrotnica	4
odbiornik/RBO	80
Podajnik	97
Transporter	20
Wiertarka	303

Zawarta w tabeli 4.6 liczba uszkodzeń dla obrotnicy (4 awarie) w przyjętym dwuletnim okresie, pozwoliła przyjąć założenie, że z powodu rzadkości występowania zdarzeń awaryjnych nie zostanie ujęta w badanym modelu.

Chwile, w których następuje zmiana stanu S_i (i = 0, 1, ..., 5) systemu oznaczają chwile awarii systemu technicznego lub momenty, w których rozpoczyna się użytkowanie systemu technicznego uznanego za zdatny (rys.4.2).

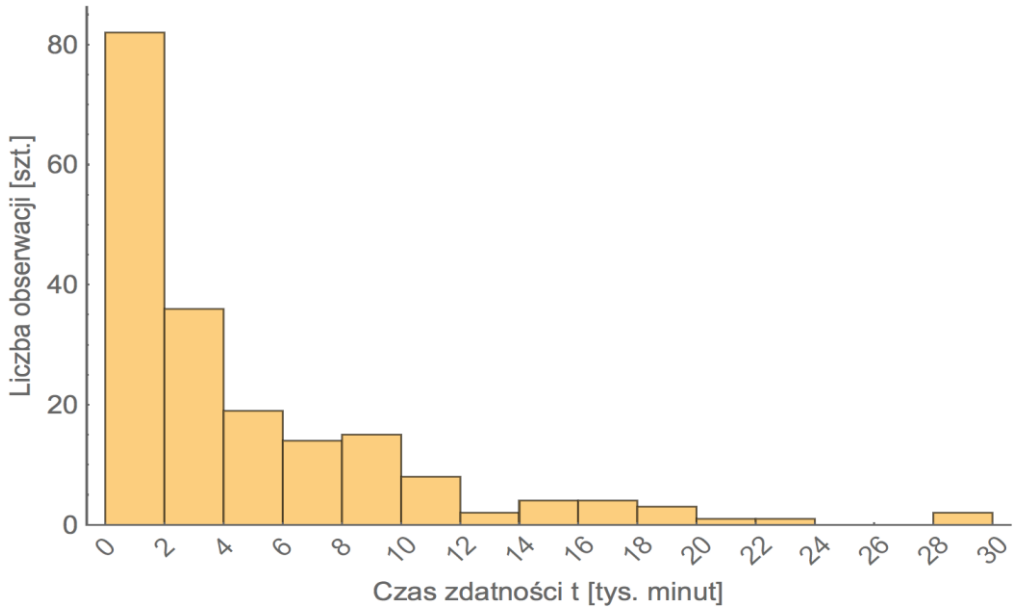


Rysunek 4.2. Realizacja procesu eksploatacji badanego systemu technicznego {W(t): $t \geq 0$}: S_0 – stan zdatności, S_1 – stan niezdatności frezarko-czopiarki, S_2 – stan niezdatności odbiornika/RBO, S_3 – stan niezdatności podajnika, S_4 – stan niezdatności transportera, S_5 – stan niezdatności wiertarki. (*Źródło: opracowanie własne*)

Z wykresu wynika, że system techniczny może się znajdować tylko w dwóch wzajemnie wykluczających się stanach: zdatności i niezdatności oraz jego elementy nie mogą się znajdować w jakichkolwiek stanach pośrednich. Wynika z tego, że stan S_0 trwa do chwili uszkodzenia się jakiegokolwiek zespołu funkcjonalnego systemu i przechodzi do jednego ze stanów niezdatności. Po dokonaniu naprawy, system techniczny zawsze wraca do stanu S_0.

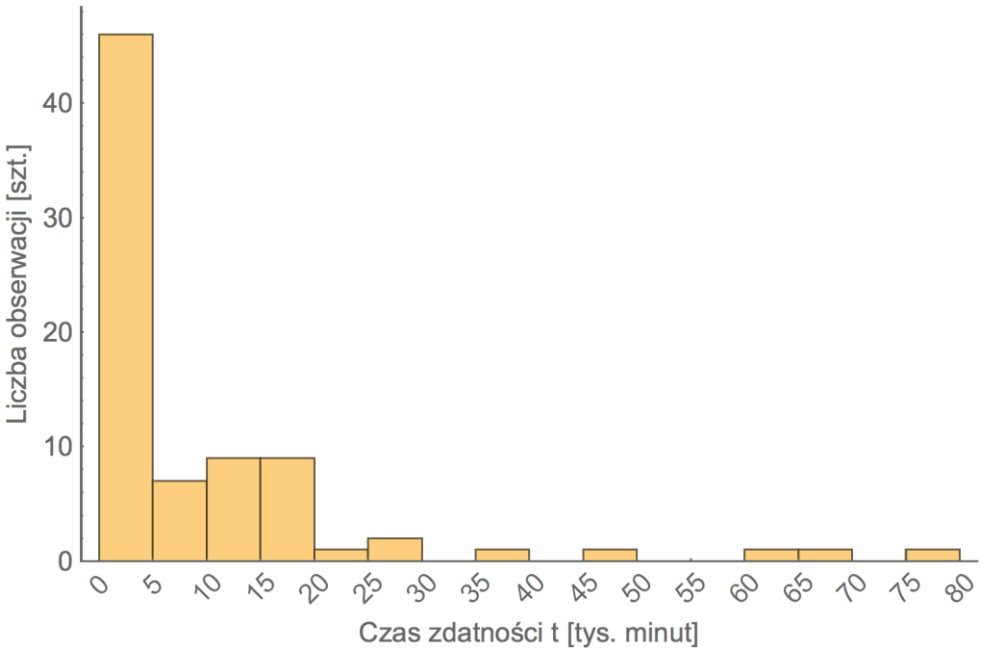
W dalszej kolejności wyznaczono histogramy liczbowe czasów bezawaryjnej pracy (czasów zdatności) poszczególnych elementów badanego systemu technicznego. Do wyznaczenia histogramów wykorzystano program Mathematica. Podczas wyznaczania histogramów nie wyznaczono histogramu dla obrotnicy/obracaka z uwagi na małą liczbę zarejestrowanych zdarzeń (danych), która uniemożliwi wyznaczenie rozkładu czasu zdatności tego elementu oraz esty-

macji parametrów rozkładu. Z uwagi na powyższe w dalszych badaniach pominięto ocenę niezawodności tego elementu przyjmując założenie, że tak mała liczba zdarzeń nie wpłynie znacząco na semi-Markowski model niezawodności oraz wyniki dalszych analiz z użyciem tego modelu. Histogramy czasów zdatności przedstawiono na rysunkach od 4.3 do 4.7.



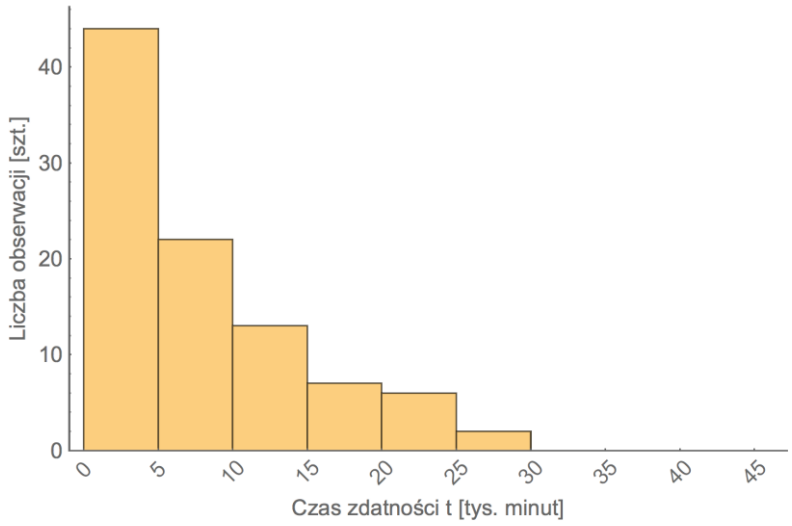
Rysunek 4.3. Histogram obserwacji bezawaryjnej pracy frezarko–czopiarki.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Z powyższego histogramu (rys. 4.3) wynika, że zakres czasu zdatności dla frezarko-czopiarki zawiera się w przedziale od 0 do 30 000 minut. Histogram ukazuje 15 przedziałów o długości 2000 min. Na podstawie histogramu można wnioskować, że funkcja rozkładu czasu zdatności będzie miała właściwości oczekiwanej w procesie semi–Markowa funkcji wykładniczej. Najliczniejszym przedziałem czasu zdatności jest przedział od 0 do 2000 minut.



Rysunek 4.4. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy odbiornika (RBO).
(*Źródło: opracowanie własne*)

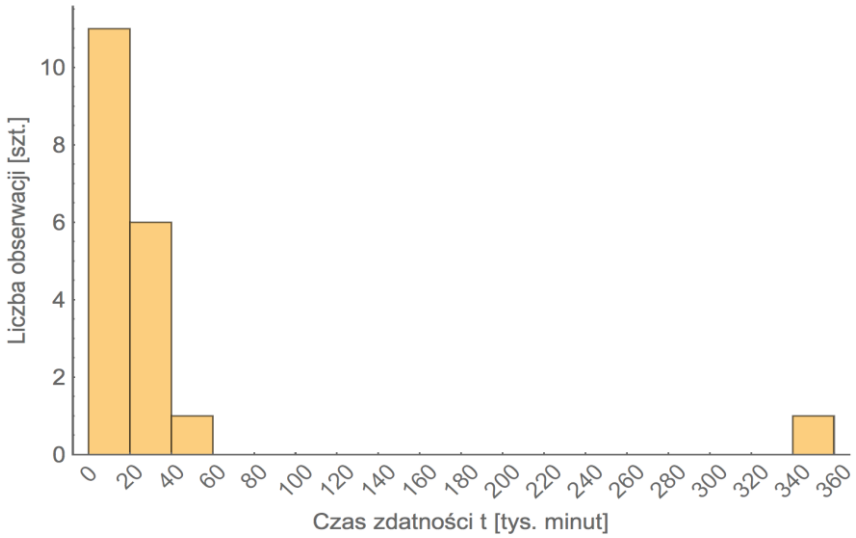
Z powyższego histogramu (rys. 4.4) wynika, że zakres czasu zdatności dla odbiornika (RBO) zawiera się w przedziale od 0 do 80 000 minut. Histogram stanowi 16 przedziałów o długości 5000 min. Na podstawie histogramu można wnioskować, że funkcja rozkładu czasu zdatności będzie miała właściwości oczekiwanej w procesie semi–Markowa funkcji wykładniczej. Najliczniejszym przedziałem bezawaryjnej pracy jest przedział od 0 do 5000 minut.



Rysunek 4.5. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy podajnika.
(*Źródło: opracowanie własne*)

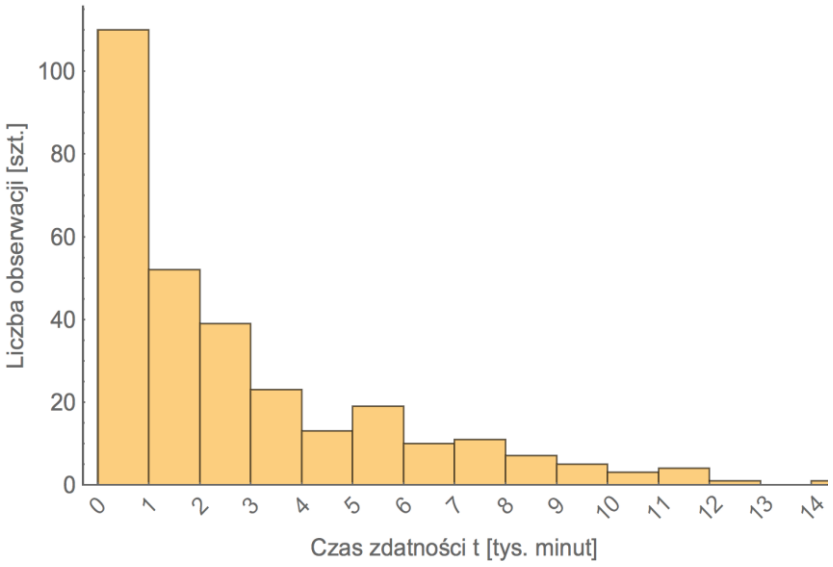
Z powyższego histogramu (rys. 4.5) wynika, że zakres czasu zdatności dla podajnika zawiera się w przedziale od 0 do 45 000 minut. Histogram stanowi 9 przedziałów o długości 5000 min. Na podstawie histogramu można wnioskować, że funkcja rozkładu czasu zdatności będzie

miała właściwości oczekiwanej w procesie semi–Markowa funkcji wykładniczej. Najliczniejszym przedziałem czasu zdatności jest przedział od 0 do 5000 minut.



Rysunek 4.6. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy transportera.
(*Źródło: opracowanie własne*)

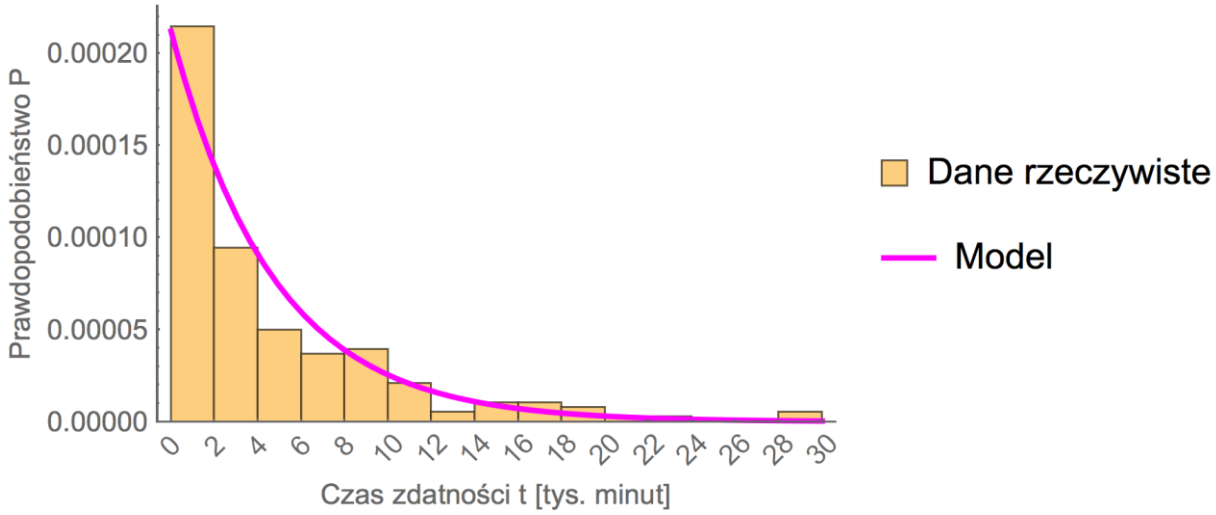
Z powyższego histogramu (rys. 4.6) wynika, że zakres czasu zdatności dla transportera zawiera się w przedziale od 0 do 360 000 minut. Histogram stanowi 18 przedziałów o długości 20000 min. Na podstawie histogramu można wnioskować, że funkcja rozkładu czasu zdatności będzie miała właściwości oczekiwanej w procesie semi–Markowa funkcji wykładniczej. Najliczniejszym przedziałem czasu zdatności jest przedział od 0 do 20000 minut.



Rysunek 4.7. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy wiertarki.
(*Źródło: opracowanie własne*)

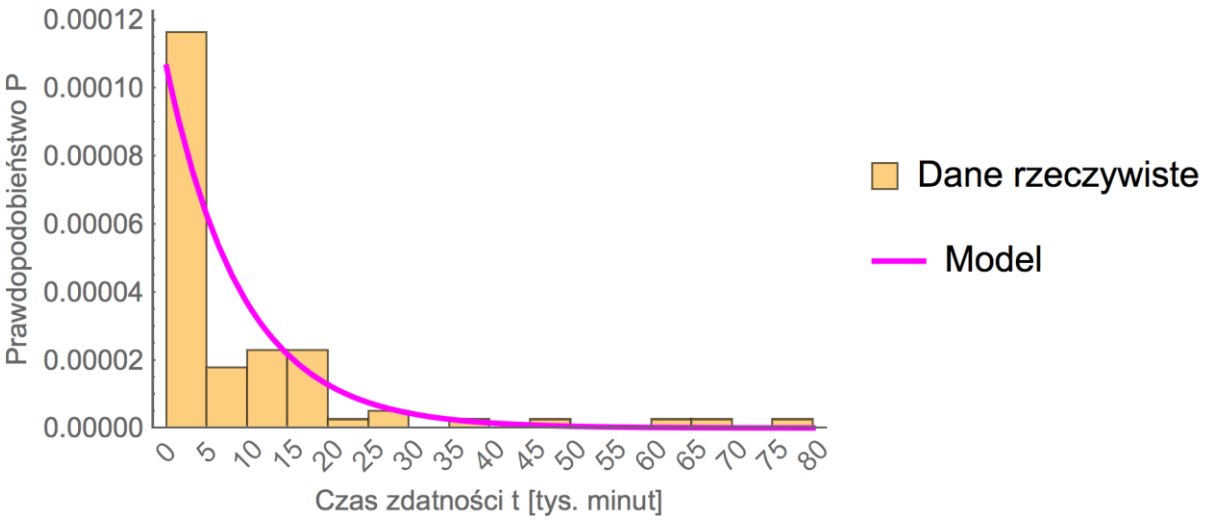
Z powyższego histogramu (rys. 4.7) wynika, że zakres czasu zdatności dla wiertarki zawiera się w przedziale od 0 do 14 000 minut. Histogram stanowi 14 przedziałów o długości 1000 min. Na podstawie histogramu można wnioskować, że funkcja rozkładu czasu zdatności będzie miała właściwości oczekiwanej w procesie semi–Markowa funkcji wykładniczej. Najliczniejszym przedziałem czasu zdatności jest przedział od 0 do 1000 minut.

Na podstawie opracowanych histogramów, dla poszczególnych elementów badanego systemu, dokonano wyznaczenia rozkładów określających funkcję gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności poszczególnych elementów badanego systemu technicznego. Do wyznaczenia rozkładów wykorzystano funkcję wykładniczą, która zgodnie z teorią procesów semi-Markowskich pozwoli na opracowanie modelu niezawodności badanego systemu technicznego. Wyznaczenia rozkładów dokonano z wykorzystaniem programu Mathematica. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa przedstawione są na rysunkach od 4.8 do 4.12.



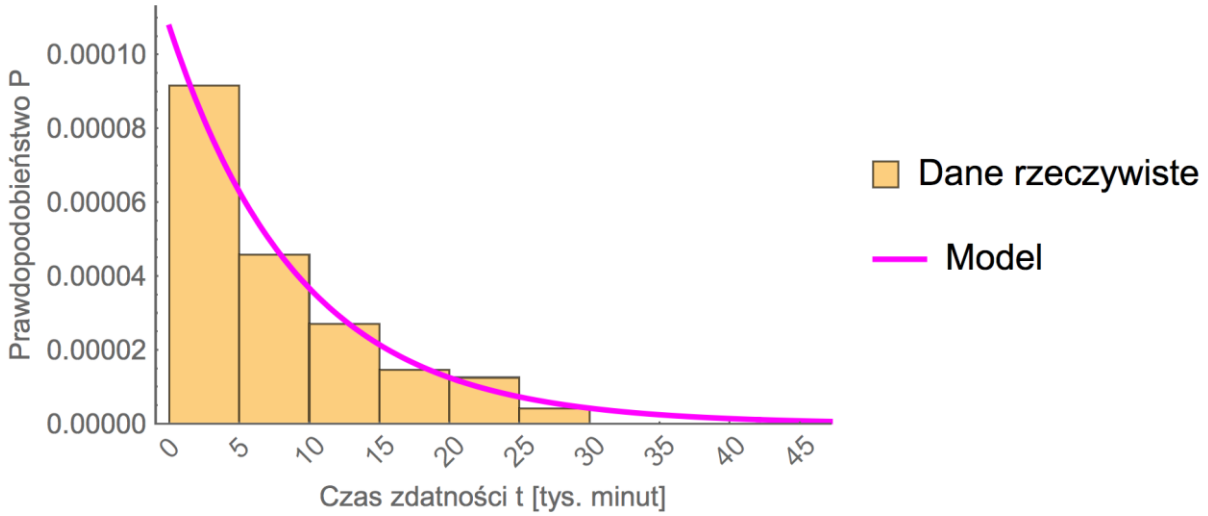
Rysunek 4.8. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności frezarko-czopiarki.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Na podstawie histogramu (rys. 4.8) oraz przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności można stwierdzić, że funkacja ta pozwoli, z dużym przybliżeniem podczas dalszej analizy, na wyznaczanie czasu zdatności frezarko-czopiarki. Parametry oraz postać funkcji rozkładu przedstawiono w tabeli 4.7.



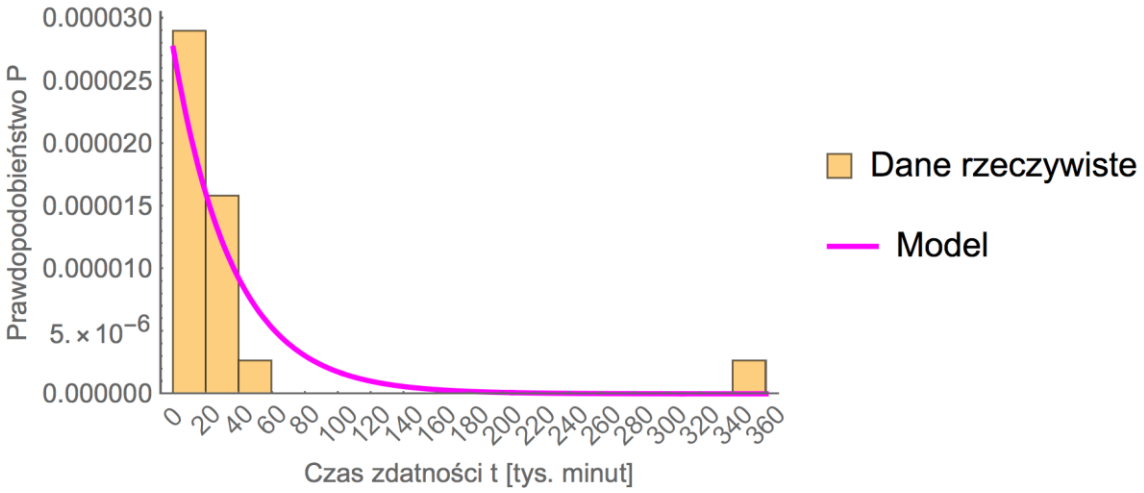
Rysunek 4.9. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności odbiornika/RBO.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Na podstawie powyższego histogramu (rys. 4.9.) oraz przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności można stwierdzić, że funkacja ta pozwoli, z dobrym przybliżeniem podczas dalszej analizy, na wyznaczanie czasu zdatności odbiornika/RBO. Spodziewane różnice pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi z modelu rozkładu będą występować w przedziale od 0 do 15 000 minut, wpływając na wartość prawdopodobieństwa wystąpienia awarii odbiornika/RBO w tym przedziale czasowym. Parametry oraz postać funkcji rozkładu przedstawiono w tabeli 4.7.



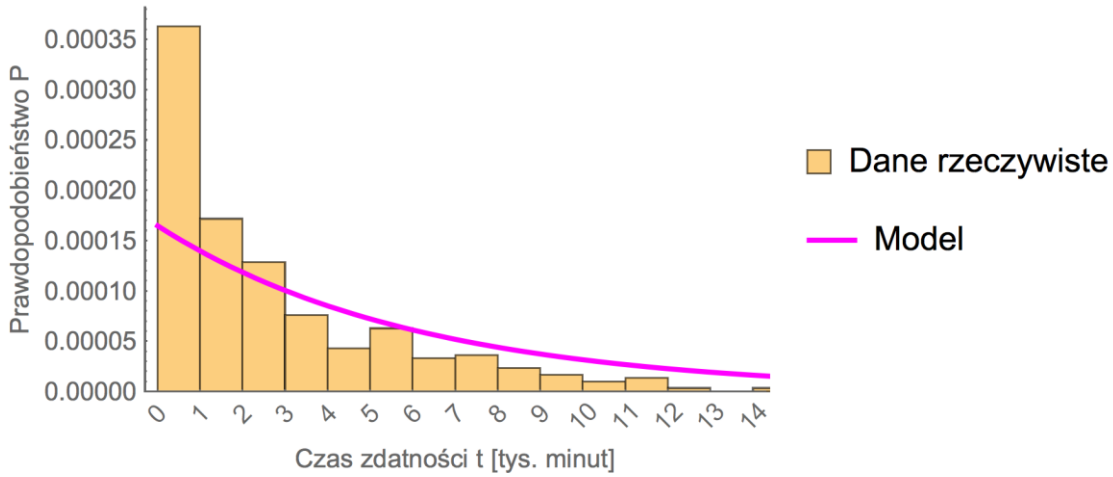
Rysunek 4.10. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności podajnika.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Na podstawie powyższego histogramu oraz przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności można stwierdzić, że funkacja ta pozwoli, z dużym przybliżeniem podczas dalszej analizy, na wyznaczanie czasu zdatności podajnika. Parametry oraz postać funkcji rozkładu przedstawiono w tabeli 4.7.



Rysunek 4.11. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności transportera.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Na podstawie histogramu (rys. 4.11) oraz przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności można stwierdzić, że funkacja ta pozwoli, z dobrym przybliżeniem podczas dalszej analizy, na wyznaczanie czasu zdatności transportera. Spodziewane różnice pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi z modelu rozkładu będą występować w przedziale od 40 000 do 140 000 minut, wpływając na wartość prawdopodobieństwa wystąpienia awarii transportera w tym przedziale czasowym. Parametry oraz postać funkcji rozkładu przedstawiono w tab. 4.7.



Rysunek 4.12. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności wiertarki.
(*Źródło: opracowanie własne*)

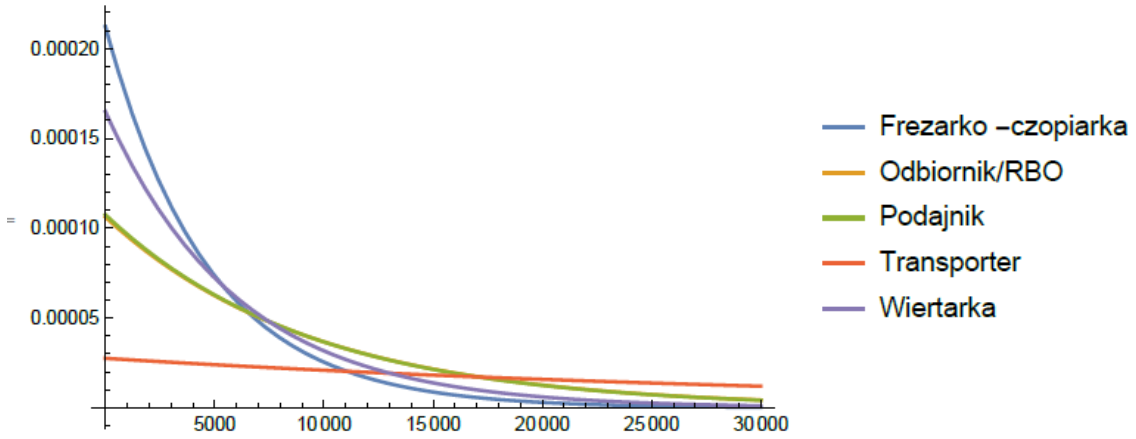
Na podstawie powyższego histogramu (rys. 4.12) oraz przebiegu funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności można stwierdzić, że funkacja ta pozwoli, z dobrym przybliżeniem podczas dalszej analizy, na wyznaczanie czasu zdatności wiertarki. Spodziewane różnice pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi z modelu rozkładu będą występować w przedziale od 0 do 4000 minut (w szczególności w przedziale od 0 do 2000 minut), wpływając na wartość prawdopodobieństwa (znaczne zaniżenie) wystąpienia awarii wiertarki w tym przedziale czasowym. Parametry oraz postać funkcji rozkładu przedstawiono w tabeli 4.7.

Dla wyznaczonych rozkładów czasów zdatności poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego określono współczynniki λ oraz równania funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności. Z wykorzystaniem tych równań istnieje możliwość wyznaczenia wartości prawdopodobieństwa wystąpienia awarii dowolnego elementu badanego systemu, w dowolnym czasie jego eksploatacji. Parametry oraz postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności wszystkich elementów badanego systemu technicznego przedstawiono w tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Parametry oraz postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności elementów badanego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Element systemu	$\boldsymbol{\lambda[\frac{1}{min}]}$	**Postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa**
frezarko-czopiarka	0,000212107	$f_{k1}(t) = 0{,}000212107e^{-0{,}000212107t}$
odbiornik/RBO	0,000106174	$f_{k2}(t) = 0{,}000106174e^{-0{,}000106174t}$
podajnik	0,000107465	$f_{k3}(t) = 0{,}000107465e^{-0{,}000107465t}$
transporter	0,0000275862	$f_{k4}(t) = 0{,}0000275862e^{-0{,}0000275862t}$
wiertarka	0,000164834	$f_{k5}(t) = 0{,}000164834e^{-0{,}000164834t}$

Skumulowane wykresy gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego przedstawiono na rysunku 4.13.

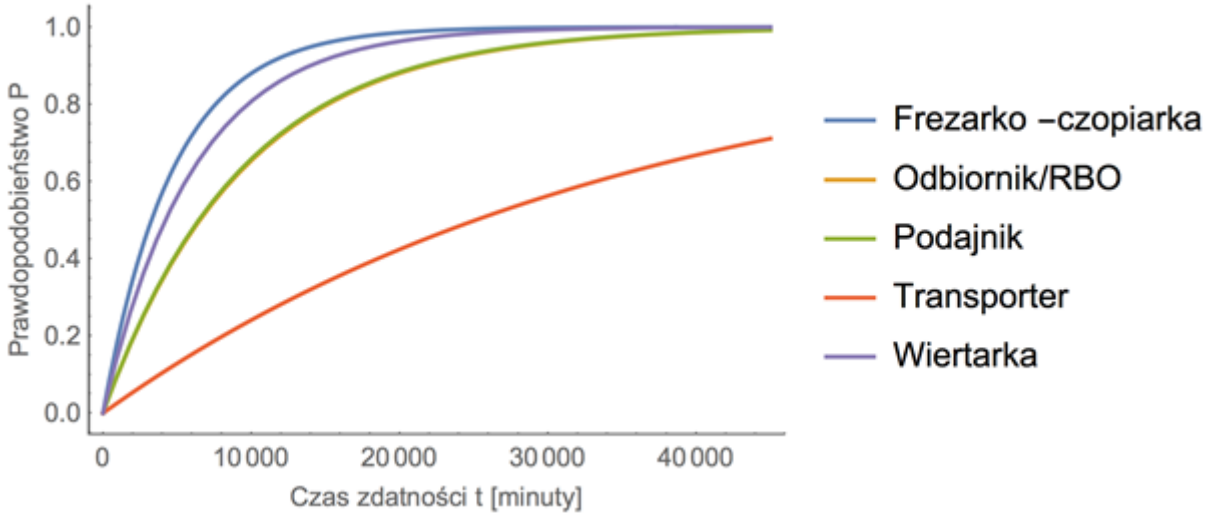


Rysunek 4.13. Zestawienie gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności elementów złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego przedstawione na rysunku 4.13 pozwalają na odczytanie wartości prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności do stanu niezdatności (wystąpienia awarii) dowolnego elementu systemu, w dowolnym czasie *t* jego eksploatacji. Wyznaczone funkcje poddano sprawdzeniu otrzymując dla każdej z nich pole pod funkcją (wartość całki) o wartości równiej 1, co potwierdza poprawność wyznaczonych funkcji. Z przebiegów funkcji można wnioskować, że największe prawdopodobieństwa wystąpienia awarii występują dla czasów eksploatacji w przedziale od 0 do 2000 minut. Największe prawdopodobieństwo wystąpienia awarii w tym przedziale czasowym występuje z powodu awarii odpowiednio: frezarko-czopiarki, wiertarki, podajnika, odbiornika/RBO oraz transportera. Analizując przebiegi powyższych funkcji można stwierdzić, że dla czasu powyżej około 5500 minut (miejsce przecięcia się funkcji) tendencja ta ulega zmianie i największe prawdopodobieństwo wystąpienia awarii będzie z powodu awarii odpowiednio: podajnika, odbiornika/RBO, wiertarki, frezarko-czopiarki oraz transportera. Można zauważyć także, że przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla odbiornika/RBO oraz podajnika ma podobny charakter w całym zakresie rozpatrywanego czasu eksploatacji. Natomiast funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla transportera charakteryzuje się niemal stałym przebiegiem, który spowodowany jest małą liczbą zarejestrowanych zdarzeń (danych). Zwrócono także uwagę na fakt, że największą liczbę zarejestrowanych zdarzeń (danych), w rozpatrywanym podczas badań okresie czasu, posiada wiertarka. Należałoby spodziewać się zatem, że to właśnie prawdopodobieństwo wystąpienia awarii wiertarki będzie największe, a nie frezarko–czopiarki. Jednak jak wykazano podczas wyznaczania funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla wiertarki, w zakresie czasu od 0 do 4000 minut, model

znacznie zaniża wartość prawdopodobieństwa w tym przedziale czasowym. Można byłoby to poprawić stosując inną funkcję rozkładu, jednak wówczas nie mogłaby ona być wykorzystana do przyjętych założeń budowy semi–Markowskiego modelu niezawodności badanego systemu.

Wyznaczając dystrybuanty (funkcje kumulatywne) funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego (rys. 4.13), dokonano wyznaczenia przebiegu funkcji prawdopodobieństwa zmiany stanu ze zdatnego na niezdatny poszczególnych elementów systemu technicznego, w zależności od czasu eksploatacji. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program Mathematica. Przebieg powyższych funkcji przedstawiono na rysunku 4.14.



Rysunek 4.14. Zależność funkcji prawdopodobieństwa zmiany stanu ze zdatnego na niezdatny poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego od czasu.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Funkcje prawdopodobieństwa (dystrybuanty) przedstawione na rysunku 4.14. pozwalają na odczytanie wartości prawdopodobieństwa przejścia zmiany stanu ze zdatnego na niezdatny poszczególnych elementów systemu, w dowolnym czasie *t* jego eksploatacji. Na podstawie przebiegów można wnioskować, że największe zmiany prawdopodobieństwa, w zakresie od 0 do 90 %, występują w przedziale czasu eksploatacji od 0 do 10000 minut. Można wnioskować także, że z prawdopodobieństwem bliskim 100% utrata zdatności przez frezarko–czopiarkę oraz wiertarkę nastąpi po czasie 22000 min, odbiornika/RBO oraz podajnika po czasie 40000 minut, a transportera po czasie około 140000 minut.

Dysponując współczynnikami λ (intensywnością uszkodzeń) poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego możliwe było wyznaczenie, zgodnie z zależnością (4.5), skumulowanej intensywności uszkodzeń Λ całego systemu, której wartość wynosi:

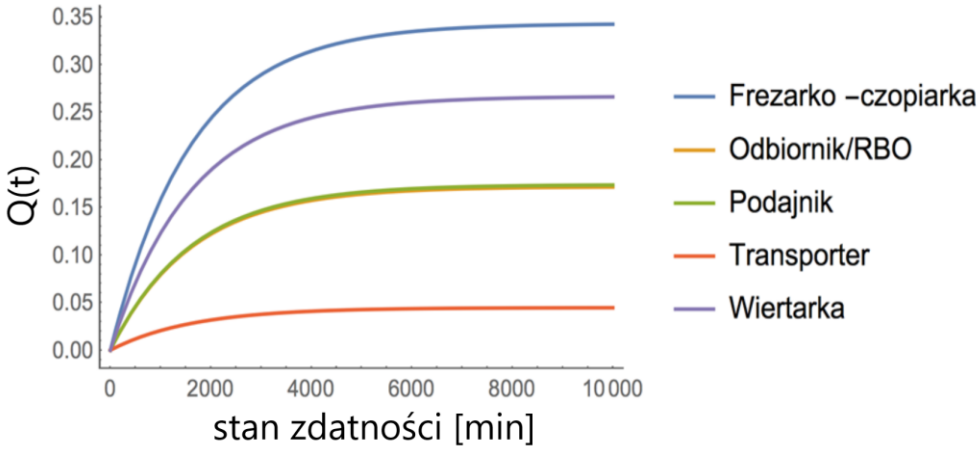
$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 0{,}000618166[\frac{1}{min}] \tag{4.14}$$

Otrzymaną skumulowaną intensywność uszkodzeń Λ wykorzystano do zamiany całki po zbiorze D (4.6.), na całkę iterowaną określoną zależnością (4.11), dzięki której wyznaczono równania funkcji prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów. Postacie powyższych funkcji przedstawiono w tabeli 4.8.

Tabela 4.8. Postać funkcji prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów. (*Źródło: opracowanie własne*)

element systemu	**postać funkcji**
frezarko-czopiarka	$Q_{N+1\,k1}(t) = \frac{0{,}000212107}{0{,}000618166} e^{-0{,}000618166t}$
odbiornik/RBO	$Q_{N+1\,k1}(t) = \frac{0{,}000106174}{0{,}000618166} e^{-0{,}000618166t}$
podajnik	$Q_{N+1\,k1}(t) = \frac{0{,}000107465}{0{,}000618166} e^{-0{,}000618166t}$
transporter	$Q_{N+1\,k1}(t) = \frac{0{,}0000275862}{0{,}000618166} e^{-0{,}000618166t}$
wiertarka	$Q_{N+1\,k1}(t) = \frac{0{,}000164834}{0{,}000618166} e^{-0{,}000618166t}$

Przebieg funkcji pokazano na rysunku 4.15.



Rysunek 4.15. Zestawienie funkcji prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów. *(Źródło: opracowanie własne)*

Funkcje prawdopodobieństwa przedstawione na rysunku 4.15 pozwalają na odczytanie wartości prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów, w dowolnym czasie *t* eksploatacji systemu. Na podstawie przebiegów można wnioskować, że największe zmiany prawdopodobieństwa występują w przedziale czasu eksploatacji od 0 do 4000 minut, a po czasie 6000 minut wartości prawdopodobieństwa osiągają w przybliżeniu wartości stałe. Można wnioskować także, że niezdatność rozpatrywanego systemu technicznego zależeć będzie w największym stopniu od awarii odpowiednio: frezarko-czopiarki, wiertarki, odbiornika/RBO, podajnika oraz transportera. Dla przykładu, dla przewidywanego czasu eksploatacji systemu 2000 minut, prawdopodobieństwo jego niezdatności z powodu uszkodzenia frezarko-czopiarki wynosi około 25%, z powodu uszkodzenia wiertarki około 20%, z powodu uszkodzenia odbiornika/RBO oraz podajnika około 12%, a z powodu uszkodzenia transportera – około 3%. Należy w tym miejscu przypomnieć, że model funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności dla wiertarki, w zakresie czasu od 0 do 4000 minut, znacznie zaniża wartość prawdopodobieństwa w tym przedziale czasowym. Dlatego też z uwagi na powyższe, jak również na podstawie wiedzy i doświadczenia autora można przyjąć, że prawdopodobieństwo niezdatności systemu z powodu uszkodzenia wiertarki będzie co najmniej równie prawdopodobieństwu niezdatności systemu z powodu uszkodzenia frezarko-czopiarki.

Dysponując wyznaczonymi równaniami funkcji prawdopodobieństwa przedstawionymi w macierzy i podstawiając te równania odpowiednio do ostatniego wiersza otrzymano następującą postać jądra procesu:

$$Q(t)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{0,000212107}{0,000618166}e^{-0,000618166t} & \frac{0,000106174}{0,000618166}e^{-0,000618166t} & \frac{0,000107465}{0,000618166}e^{-0,000618166t} & \frac{0,0000275862}{0,000618166}e^{-0,000618166t} & \frac{0,000164834}{0,000618166}e^{-0,000618166t} & 0 \end{bmatrix}\begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_0 \end{matrix}$$

Otrzymana macierz przedstawiająca postać jądra procesu stanowi tym samym semi–Markowski model niezawodności rozpatrywanego systemu technicznego.

Na podstawie powyższego modelu, jest możliwe obliczenie prawdopodobieństwa zmiany stanu rozpatrywanego systemu technicznego ze stanu jego zdatności do stanu niezdatności, spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów, w dowolnym czasie *t* eksploatacji systemu. Zmiany prawdopodobieństwa oraz jego wartości, w zależności od czasu eksploatacji systemu, przedstawione są na rysunku 4.15. Przyjmując do obliczeń wartości prawdopodobieństwa granicę czasu $t \to \infty$, można wyznaczyć graniczne wartości prawdopodobieństwa zmiany stanu rozpatrywanego systemu technicznego, ze stanu jego zdatności do stanu niezdatności, spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów.

Poniżej przedstawiono macierz prawdopodobieństw zmiany stanu rozpatrywanego systemu technicznego zawierającą graniczne wartości prawdopodobieństwa:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,34 & 0,17 & 0,17 & 0,04 & 0,28 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_0 \end{matrix}$$

W powyższej macierzy suma prawdopodobieństw w każdym wierszu wynosi 1, co potwierdza poprawność przeprowadzonych obliczeń oraz poprawność opracowanego semi–Markowskiego modelu niezawodności badanego systemu technicznego. Przybliżone wartości prawdopodobieństw występujących w ostatnim wierszu powyższej macierzy można również odczytać na rysunku 4.15.

W celu obliczenia liczby awarii systemu technicznego w określonym przedziale czasu oraz odchylenia standardowego obliczono momenty pierwszego i drugiego rzędu (tab. 4.9. i 4.10).

Tabela 4.9. Momenty pierwszego rzędu dla poszczególnych elementów systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

frezarko-czo-piarka $E(\gamma_1)$	odbiornik/RBO $E(\gamma_2)$	Podajnik $E(\gamma_3)$	Transporter $E(\gamma_4)$	Wiertarka $E(\gamma_5)$
4714,601593 [min]	9418,501705 [min]	9305,355232 [min]	36250,00906 [min]	6066,709538 [min]

Tabela 4.10. Momenty drugiego rzędu dla poszczególnych elementów systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

frezarko-czo-piarka $E(\gamma^2_1)$	odbiornik/RBO $E(\gamma^2_2)$	Podajnik $E(\gamma^2_3)$	Transporter $E(\gamma^2_4)$	Wiertarka $E(\gamma^5_5)$
$4{,}49894*10^{-8}$ [min]	$1{,}12729*10^{-8}$ [min]	$1{,}15487*10^{-8}$ [min]	$7{,}60998*10^{-10}$ [min]	$2{,}71702*10^{-10}$ [min]

Na podstawie wyników badań wyznaczono wartość oczekiwaną (4.8) czasu pozostawania badanego systemu technicznego w stanie zdatności:

$$E(T_6) = 1617,69 \min$$

Podstawiając do wzorów 4.9., 4.10.,4.11. otrzymano następujące wyniki:

$$E(\Theta_{66}) = 1622,69[\min]$$

$$E(\Theta^2_{66}) = 31402970,84[\min]$$

$$D(\Theta_{66}) = 5363,75[\min]$$

Zakładając, że centrum obróbcze realizuje swoje zadania przez siedem dni przyjęto, że czas będzie wynosił $t \approx\sim 10000[\min]$. W celu obliczenia częstości występowania awarii w tym okresie czasu zastosowano wzór 4.12.:

$$m(t) = 6,163$$

Ostatecznie podstawiając uzyskane wyniki do wzoru 4.13. uzyskano odchylenie standardowe od przeprowadzonych badań:

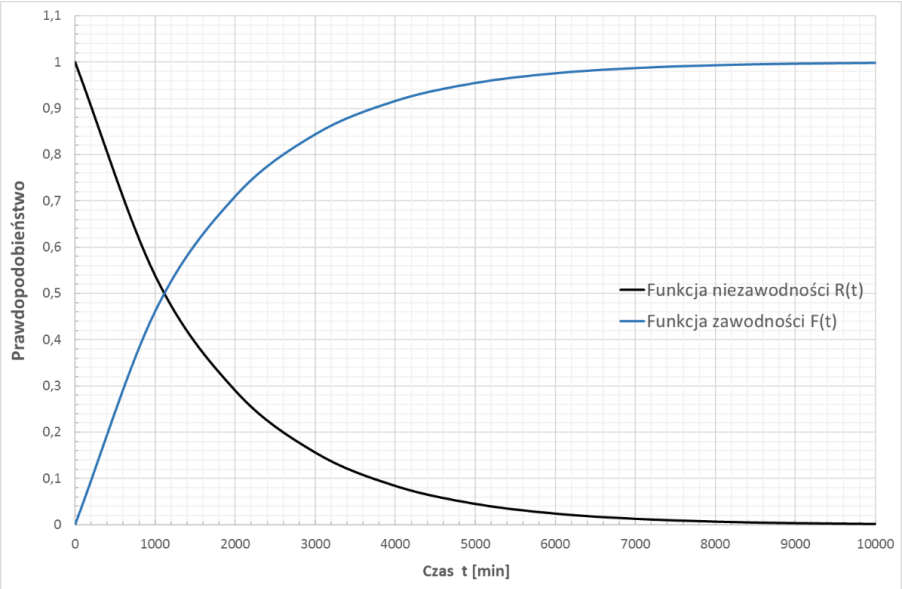
$$\sigma(t) \approx 0,821$$

Interpretując uzyskane wyniki oparte o założenia modelu teoretycznego wskazano, że oczekiwana liczba awarii trwających powyżej 10 minut w przedziale czasu [0,10000] [min] nieprzerwanej pracy systemu technicznego jest w przybliżeniu równa 6,163 z odchyleniem standardowym 0,821.

W oparciu o zbudowany model wskazano prawdopodobieństwo przejścia ze stanu zdatności do stanu niezdatności centrum obróbczego, które wynosi 1617 minut. Liczba uszkodzeń po tym czasie wynosi 1 i wraz z kolejnymi chwilami liczba awarii wzrasta. Potwierdzone zostało to w macierzy prawdopodobieństw, gdzie suma w ostatnim wierszu wyniosła 1. Przyjęto, że model został zbudowany poprawnie.

Dysponując powyższym semi–Markowskim modelem niezawodności badanego systemu technicznego, można także wyznaczyć jego charakterystyki niezawodnościowe, do których należą

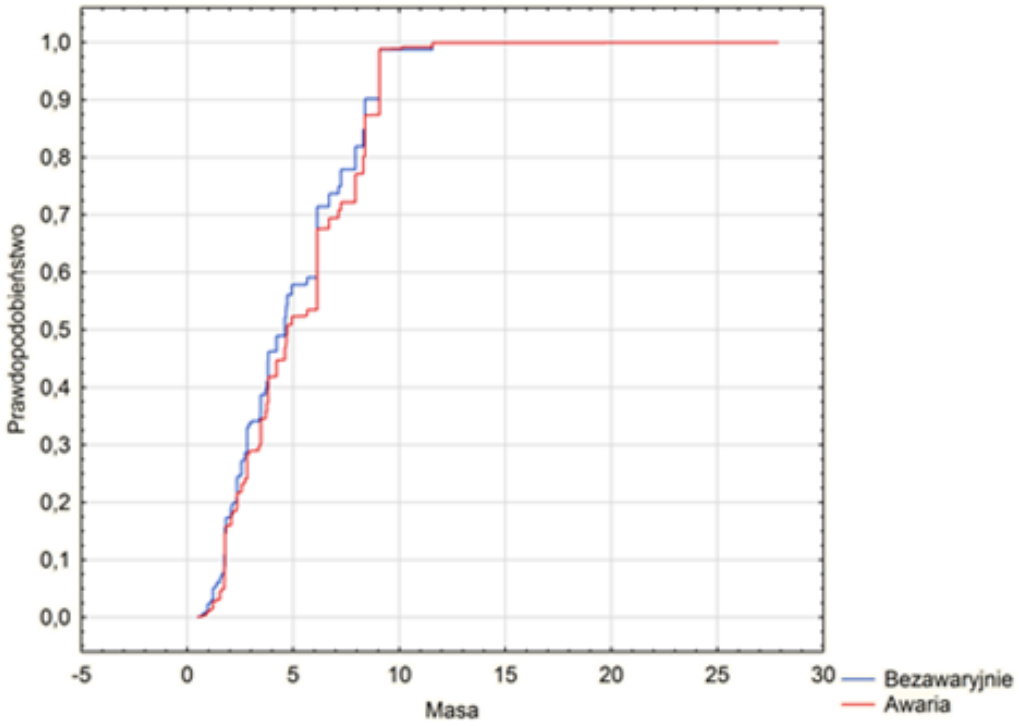
funkcja niezawodności (2.16) oraz funkcja zawodności (2.17). Przebieg wyznaczonych funkcji niezawodności i zawodności badanego systemu technicznego przedstawiono na rys. 4.16.



Rysunek 4.16. Przebieg wyznaczonych funkcji niezawodności i zawodności badanego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*)

Na podstawie przebiegu funkcji przedstawionych na rysunku 4.16 można dokonać określenia wartości prawdopodobieństwa z jakim badany system techniczny będzie pozostawał w stanie zdatności (bezawaryjnej pracy) oraz w stanie niezdatności (wystąpienia awarii), w dowolnym czasie *t* eksploatacji systemu. Dla przykładu, z przebiegu funkcji wynika, że po czasie eksploatacji 2000 minut prawdopodobieństwo, że badany system będzie pozostawał w stanie zdatności wynosi 30 % i odpowiednio prawdopodobieństwo wystąpienia awarii będzie wynosiło 70 %. Dla czasu około 1200 minut prawdopodobieństwa zarówno pozostawania systemu w stanie zdatności, jak i wystąpienia awarii będą równe i będą wynosiły 50 %.

Dążąc do pełnej charakterystyki systemu technicznego przeanalizowano związek masy produkowanego elementu w stosunku do wpływu na występowanie awarii. Do tego celu zastosowano test Kołmogorowa–Smirnowa. Test posłużył do porównania dwóch rozkładów liczbowych. W niniejszym przypadku jeden rozkład stanowiły masy wszystkich produkowanych elementów w okresie dwóch lat z partii, przy których nie doszło do awarii a drugi z partii, przy których doszło do awarii (rys. 4.17).



Rysunek 4.17. Dystrybuanty masy w zależności od wystąpienia awarii technicznej.
(*Źródło: opracowanie własne*)

Wykorzystując do badań program Statistica uzyskano wartość $p < 0{,}005$, świadczącą o istotnym statystycznie związku masy elementu z awaryjnością. Średnia masa elementu w partiach, przy których nie doszło do awarii wyniosła 4,88 a w partiach, przy których doszło do awarii wyniosła nieco więcej: 5,21. Jest to spójne z różnicą widoczną na poniższym wykresie dystrybuant (rys. 4.18). Czerwona krzywa, ogólnie przebiegająca nieco niżej niż niebieska, oznacza, że odsetek elementów o masie nieprzekraczającej ustalonej wielkości względem wszystkich elementów jest nieco wyższy w grupie elementów bezawaryjnych, niż w grupie elementów awaryjnych.

4.4 Dyskusja wyników badań

Zastosowane procesy semi–Markowa do modelowania oraz oceny niezawodności złożonych systemów technicznych, można również zastosować w przedsiębiorstwach branży meblarskiej. W praktyce zastosowanie procesów modelujących realny proces wymaga spełnienia następujących warunków:

- zgromadzenia dużej liczby danych niezbędnych do przeprowadzenia analizy statystycznej;
- opracowania modelu zmian stanów niezawodnościowych systemu technicznego oraz zbudowanie nieskomplikowanej pod względem matematycznym macierzy funkcyjnej;
- przyjęcia założeń uproszczających do modelu.

W powyższym modelu przyjęto uproszczenie w postaci dwóch stanów złożonego systemu technicznego: stanu zdatności i stanu niezdatności (rozdz. 4.2.). Przyjmując takie założenie, odwzorowano realny obiekt o strukturze szeregowej. Wyznaczona macierz funkcyjna wskazała, że prawdopodobieństwo wraz z upływem czasu będzie dążyć do ściśle określonych stałych liczb. Liczby zwane granicznym prawdopodobieństwem stanu procesu semi–Markowa, tworzą rozkład graniczny procesu. Rozkład umożliwił zdefiniowanie współczynnika gotowości technicznej, przypadający na jednostkę czasu. Zbudowany model matematyczny, wyznaczył wartość graniczną na poziomie 10000 min, czyli w przybliżeniu tydzień pracy systemu technicznego oraz liczbę występujących awarii trwających powyżej dziesięciu minut. Z perspektywy przedsiębiorstwa jest to cenna informacja, ponieważ wskazując dowolny czas wykonania jednej pełnej partii wyrobu, można oszacować prawdopodobieństwo wystąpienia awarii.

Wyznaczenie w ten sposób czasu zdatności elementów sytemu technicznego może pomóc w określeniu optymalnej wielkości produkowanej partii elementów. Przyjmuje się zwyczajowo, że eliminacja przestojów to głównie wydłużanie partii produkcyjnych celem zminimalizowania liczby przezbrojeń centrum obróbczego. Prowadzi to do przekonania, że jedyną możliwością uzyskania wyższej wydajności maszyny jest nieustanna praca na tych samych ustawieniach. Wprowadza się narzędzia diamentowe, które wymagają kąpieli odżywiczających raz w tygodniu i ostrzenia raz na kilka miesięcy. Z obliczeń wartości oczekiwanej czasu zdatności (4.12) jasno wynika, że ciągła praca na jednym ustawieniu w zaplanowanym obszarze czasowym to w przybliżeniu 1617 minut (27 godzin) z punktu widzenia prawdopodobieństwa na optymalny sposób planowania produkcji. Zmusza to osoby odpowiedzialne za przygotowywania planu produkcyjnego, aby zmienić jednostkę planowania z optymalnej liczby sztuk na optymalny czas wykorzystania maszyny, a tak uzyskana liczba sztuk wyrażałaby pochodną tego czasu. Nie jest to podejście łatwe do zaakceptowania, ponieważ utrudnia to proces planowania przez konieczność agregacji zleceń produkcyjnych. Przykładowo, dla wieńca górnego biurka o wymiarach 1200x550x18mm (6,08 kg) przyjęto optymalną wielkość wsadu 2000 sztuk. Planowy czas wykonania takiej liczby elementów to 2,7 h, a czas przezbrojenia to 0,51 h. Dzienna wydajność dla takiego elementu to 14940 szt. Podchodząc do planowania z punktu widzenia optymalnej wielkości czasu wykorzystania, można uzyskać dzienną efektywność na poziomie pomiędzy 17581, a 17675 sztuk. Jest to wzrost o ponad 17%. W przypadku dalszego wydłużania czasów ciągłej produkcji, efektywność dzienna nie zmienia się w sposób znaczny. Powoduje jedynie konieczność zwiększania buforów produkcyjnych i generuje dodatkowe koszty.

W praktyce przedsiębiorstwo powinno również uwzględniać zmiany stosunków procentowego udziału elementów z określonych przedziałów masowych. Teoretyczne obciążenie linii produkcyjnej z punktu widzenia liczby elementów może wydawać się stabilne, nawet przy częstej wymianie produkowanego asortymentu. Z punktu widzenia masy produkowanych elementów, wiedza o ich wpływie na występowanie awarii może pomóc w lepszym planowaniu prac remontowych przez SUR. Znając specyfikę uszkodzonych części maszyn, możliwe będzie lepsze planowanie ich zapasu (w wyniku powtarzalności jednego typu awarii) oraz dążenie do projektowania zamienników mających większą wytrzymałość materiałową. Podjęcie współpracy przez SUR z konstruktorem maszyn i urządzeń wchodzących w skład centrum obróbczego, może w przyszłości wygenerować obiekty techniczne o wyższym stopniu odporności na uszkodzenia. W punktu widzenia przedsiębiorstwa, pozwoli to na ograniczenie w pewnym stopniu występowania awarii przez co zaistnieje wyższe prawdopodobieństwo terminowej realizacji procesu oraz ograniczenie kosztów w wyników nieplanowanych przestojów.

Istotę problem, który aktualnie jest nie dostrzegany przez przedsiębiorstwo pokazuje przykład 1, gdzie masa produkowanych elementów miała bezpośredni wpływ na produktywność i stabilność finansową przedsiębiorstwa.

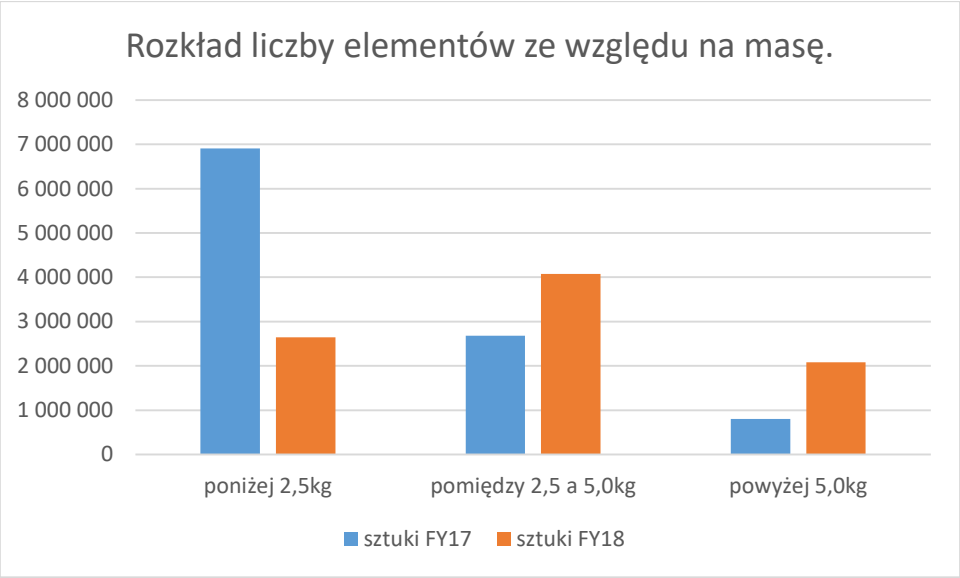
Przykład 1.

W jednym z poddanych badaniu zakładów produkcyjnych w roku finansowym 2017 zaplanowano 10 390 539 sztuk elementów do wyprodukowania na linii formatyzerko–czopiarek. Rok 2018 przyniósł konieczność wyprodukowania tylko 8 790 218 sztuk. Przy analizie ilościowej przedsiębiorstwo nie zauważyło powstającego zagrożenia. Rozkład elementów w wybranych kategoriach wagowych odpowiednio dla lat 2017 i 2018 przedstawia tabela 4.11.

Tabela 4.11. Udział elementów w 3 grupach wagowych dla kolejnych lat finansowych z uwzględnieniem wymiany asortymentu na przełomie lat. (*Źródło: opracowanie własne*)

Sztuki	rok finansowy	poniżej 2,5 kg	pomiędzy 2,5 a 5,0 kg	powyżej 5,0 kg
	FY 17	6 910 106	2 677 389	803 044
	FY 18	2 641 553	4 071 606	2077059

Informacje zawarte w tabeli zestawiono graficznie na rysunku 4.18.



Rysunek 4.18. Wykres udziału produkowanych elementów w trzech grupach wagowych. (*Źródło: opracowanie własne*)

Liczba elementów (rys. 4.18.) o masie do 2,5 kg spadła o 62%, natomiast liczba elementów o masie powyżej 5 kg wzrosła niemalże trzykrotnie. Przedsiębiorstwo po 3 miesiącach od rozpoczęcia produkcji napotkało problem w terminowej realizacji planu produkcyjnego ze względu na przestoje z powodu awarii technicznych. Zależność między masą elementów a prawdopodobieństwem wystąpienia awarii istniała już dla mebli w konstrukcji ramowej, jednakże przeważająca liczba elementów o masie poniżej 2,5 kg (płyciny drzwi i boków o grubości 7 mm, czoła szuflad o grubości 14 mm) nie wymuszały dodatkowych działań z tytułu zbyt długich przestojów awaryjnych. Po wprowadzeniu mebli panelowych o nie–ramowej konstrukcji skrzyniowej, liczebność elementów o grubości 7 mm wzrosła o 30%. Również zmianie uległy gabaryty elementów, gdyż nowa rodzina produktów potrzebowała płycin drzwi przesuwnych o znacznych rozmiarach. Wyeliminowano również 71% liczby elementów grubości 14 mm, głównie czół szuflad, zaliczających się w większości do kategorii wagowej poniżej 2,5 kg. W ten sposób przedsiębiorstwo przeoczyło konieczność oszacowania zapotrzebowania na czas potrzebny do usunięcia powstałych awarii i zostało zmuszone do pracy w trybie czterobrygadowym. Podwyższyło to koszty wytworzenia poszczególnych wyrobów bez niezbędnej rekompensaty ze strony klienta w wyniku czego firma straciła pozycję lidera w rentowności w ramach grupy, do której należała.

5 PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Centra obróbcze w przemyśle meblarskim należą do klasy systemów, dla których jedną z najważniejszych cech jest efektywność eksploatacji, określająca iloraz efektów uzyskanych w ustalonym przedziale czasu trwania określonego stanu systemu technicznego do nakładów poniesionych do uzyskania tych efektów. Oznacza to, że w przypadku technicznej efektywności eksploatacji centrum obróbczego, zapewniony jest odpowiedni poziom zachodzących relacji pomiędzy awaryjnością obiektu, a jego potencjalną zdolnością do realizacji zadań. Zapewnienie wysokiego poziomu efektywności jest możliwe w wyniku sterowania procesem eksploatacji w taki sposób, że podejmowane decyzje są optymalne ze względu na przyjęte kryteria oceny.

Kierowanie procesem eksploatacji systemów technicznych w nowoczesnych fabrykach produkujących meble, ze względu na stopień ich złożoności jest na tyle skomplikowane, że zachodzi konieczność opracowywania i stosowania odpowiednich metod i modeli matematycznych, umożliwiających opis zmieniających się w czasie wielkości losowych. Opracowany w pracy semi–Markowski model niezawodności uwzględnia wpływ czynników losowych, istotnych dla eksploatacji badanego systemu technicznego.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zaproponowana w dysertacji metodyka badań oraz opracowany model efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych pozwala na wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia stanu niezdatności złożonego systemu technicznego o strukturze szeregowej w przemyśle branży meblarskiej.
2. Raportowane przez przedsiębiorstwo informacje o stanie technicznym maszyn i urządzeń, a także o realizacji planu produkcyjnego, dają możliwość budowy semi–Markowskiego modelu niezawodności dla rozpatrywanego centrum obróbczego.
3. Opisane w rozprawie podejście segregowania danych o wszystkich przestojach na cztery kategorie daje możliwość uzyskania wiarygodnych informacji o awariach technicznych.
4. Miary efektywności eksploatacji systemów technicznych: MTBF, MTTR, MTTF oraz OEE przedstawiają jedynie uśrednione czasy odpowiednio: dostępności, pomiędzy awariami, odnowy systemu, do wystąpienia awarii – które nie zawierają pełnej informacji o niezawodności badanego systemu i nie dają możliwości jej prognozowania
5. Wiedza o możliwościach eksploatacyjnych tego typu złożonych systemów technicznych oraz próba interpretacji pozyskanych danych może w przyszłości pozwolić na skuteczniejsze planowanie prac serwisowych oraz efektywniej zarządzać czasem eksploatowanych obiektów. W przyszłości może to umożliwić również minimalizację występowania awarii.

6. Zastosowanie opracowanej metodyki pozwala na:
   - określenie kosztów przestoju centrów obróbczych w wyniku awarii;
   - wyznaczenie maksymalnego czasu pozostawania systemu technicznego w stanie zdatności;
   - wskazanie liczby awarii w określonym przedziale czasu systemu technicznego;
   - wskazanie prawdopodobieństwa przejścia do stanu niezdatności każdego z elementów systemu technicznego;
   - wskazanie grupy produkowanych elementów, które najczęściej generują awarie w wyniku własnej masy;
   - skuteczniejsze planowanie realizacji procesu technologicznego w przedsiębiorstwie.
7. Zaproponowaną w pracy metodę można zastosować dla innych centrów obróbczych o strukturze szeregowej, pod warunkiem posiadania danych dotyczących liczby produkowanych elementów, ich masy, informacjach o przestojach oraz miejscu wystąpienia awarii.
8. Stosowane wskaźniki oceny niezawodności (OEE, MTTR, MTTF, MTBF) centrów obróbczych mają istotną wartość informacyjną, ale nie zapewniają wystarczająco dokładnego opisu oddziaływania elementów systemu na rozpatrywany system techniczny.

Zaprezentowane wyniki badań w pełni oddają rzeczywistą intensywność uszkodzeń, ponieważ wszystkie działania związane z centrum obróbczym były raportowane zarówno przez operatorów, jak i w przypadku wystąpienia stanu niezdatności – przez SUR. Informacje zawarte w systemie w pełni oddają informacje o bezpośrednich przyczynach uszkodzenia. Natomiast planując wykonanie zadań, nie bierze się pod uwagę masy elementu, lecz liczbę sztuk. W ten sposób określa się wydajność centrum. W rozumieniu autora, jest to błędne założenie. Takie założenia pozwalają operatorom „manipulować" parametrami związanymi z prędkością, co w konsekwencji po obliczeniu wskaźnika efektywności OEE może wskazać np. 120%. Operator, wpisując kod „zwolniona prędkość", właśnie odnosi się do masy elementu. Natomiast planista wykonanie planu produkcyjnego oblicza dla stałej prędkości, niezależnie czy są to elementy ciężkie, czy lekkie.

W podobny sposób wskaźnikami MTTF i MTTR manipulują służby utrzymania ruchu, wliczając lub nie, czas mikro–awarii. Nie analizują przy tym, dlaczego tak często obiekt zostaje zatrzymany na krótki czas. Ze względu na specyfikę systemu technicznego, należy uwzględnić wpływ masy na przebieg eksploatacji systemu technicznego.

W wyniku obliczonych kosztów przestoju jednej minuty centrum obróbczego (rozdz. 3) udowodniono, że choć koszt przestoju dla centrum jest stosunkowo niski, to w konsekwencji straty wynikające z przestoju na wydziale pakowni są nieporównywalne wyższe. Zadając sobie

to pytanie, autor poszukiwał modelu, który będzie odnosił się do przewidywania występowania awarii technicznych, który w wyniku podejmowanych działań planowania produkcji oraz prewencyjnych umożliwi ograniczenie przestojów centrum obróbczego. Wydaje się, że semi-Markowski (SM) model niezawodności (rozdział 4), będzie spełniał powyższe oczekiwania. Po pierwsze, zmienną jest czas, a po drugie, stan przyszły nie zależy od stanu przeszłego. W opracowanym modelu zostały spełnione następujące warunki:

- zgromadzono pełne dane dotyczące eksploatacji systemu technicznego za okres dwóch lat;
- określono strukturę systemu, przez co w modelu wyróżniono tylko dwa stany.

Z opracowanego SM modelu niezawodności wynika, że wraz z upływem czasu wartości liczbowe prawdopodobieństw dążą do ściśle określonych stałych wartości. Ciąg tych liczb tworzy rozkład graniczny procesu, umożliwiając zdefiniowanie współczynnika efektywności eksploatacyjnej, przypadającej na jednostkę czasu. W rzeczywistości tak właśnie jest i nie ma rezerwy w postaci dodatkowych maszyn.

Uzyskane wyniki badań wskazały najbardziej prawdopodobny scenariusz czasu zdatności systemu technicznego. Autor uważa, że jest to nowa koncepcja, która obliguje osoby odpowiedzialne za planowanie harmonogramów realizacji produkcji nie w oparciu o optymalną liczbę sztuk, ale o czas wykorzystania maszyn. Liczbę wyprodukowanych elementów można wtedy ustalić jako pochodną tego czasu. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość przewidywania prawdopodobieństwa wystąpienia awarii. W przypadku wieloasortymentowej produkcji wskazanie planów realizacji produkcji tylko w oparciu o produkowane sztuki jest mało stabilne.

W rozprawie wykazano również wpływ masy produkowanych elementów na występowanie stanu niezdatności. Jest to cenna informacja, uwzględniająca obszar i przyczynę wystąpienia awarii w systemie technicznym. Pozwala to SUR na planowanie zapasu części zamiennych oraz podjęcie współpracy z producentem odpowiedzialnym za wybrany element systemu technicznego, celem poprawy wytrzymałości materiałów i określeniem nowego sposobu podejmowania działań prewencyjnych. Znając plan produkcyjny SUR mają możliwość aby się lepiej przygotować do podejmowania działań naprawczych oraz mogą wywierać bezpośredni wpływ na wybór producenta (maszyn lub części zamiennych), który uwzględni obciążenie obiektu stosując trwalsze materiały.

Autor uważa, że istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań i rozwijanie powyższej koncepcji. W tym przypadku zbadano czas, ale w przyszłości należy poddać ocenie miejsce oraz przyczynę wystąpienia awarii. Prawdopodobieństwo, który element systemu technicznego ulegnie awarii oraz które elementy najszybciej się zużywają jest jednym z przyszłych celów badawczych. Dane dotyczace elementów systemu technicznego są w posiadaniu autora i będą

stanowiły kolejny etap badawczy. W przyszłości należałoby również rozszerzyć obiekt badań na systemy o strukturze równoległej. Takim przykładem jest linia lakiernicza, mająca przynajmniej dwie nakładarki przed tunelem suszącym. W przypadku awarii jednej z nich, pracuje się na drugiej bez zatrzymania całej linii.

Zaproponowaną metodę należy również doskonalić w celu zaimplementowania jej w innych przedsiębiorstwach, gdzie funkcjonują złożone systemy techniczne. W tym przypadku pracowano na jednym rodzaju materiału, ale warto dokonać analizy w przypadku obróbki wyrobów drewnopochodnych.

W konkluzji autor uważa, że istnieje potrzeba analizy występujących awarii za pomocą niezawodnościowych modeli matematycznych. Losowość czynników wpływających na efektywność procesu eksploatacji centrów obróbczych w przemyśle meblarskim, determinuje wybór typu modelu i uzasadnia celowość wykorzystywania stochastycznych modeli przebiegu procesu eksploatacji, w tym procesu Markowa i semi–Markowa.

BIBLIOGRAFIA

[1] Adamkiewicz A., Burnos A., 2012. Kluczowe wskaźniki efektywności w utrzymaniu silników spalinowych w układach energetycznych jednostek pływających, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, rok LIII, nr. 2 (189).

[2] Antosz K., Stadnicka D., 2015. Evaluation measures of machine operation effectiveness in large enterprises: study results. *Eksploatacja i niezawodność*, vol 1, s. 107–117.

[3] Antosz K., Perłowski R., 2009. Prognozowanie niezawodności maszyn technologicznych, *Technologia i Automatyzacja Montażu*, s. 33–36.

[4] Artobolewski J.J., 1967. *Teorija mekhanizmov i mashin*, Moskva.

[5] Bajkowski J., Bieniek S., Duchnowski K., 1988. *Obrabiarki i urządzenia w stolarstwie*, Warszawa: Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne.

[6] Bertalanffy L., 1984. *Ogólna teoria systemów*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[7] Biały W., Hąbek P., 2016. Zastosowanie wskaźnika OEE do oceny wykorzystania maszyn – studium przypadku, Systemy wspomagania w inżynierii produkcji, *Inżynieria Systemów Technicznych*, z.2(14) s.55–65.

[8] Białyszewski H., 1972. Koncepcja systemu w socjologii (w), *Studia Socjologiczne*, nr 3–4, s. 180.

[9] Bobrowski D., 1985. *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.

[10] Brandowski A., (red.Cygan Z.,) 1990. *Efektywność a niezawodność systemu technicznego*, Warszawa: Efektywność Eksploatacji Systemów Technicznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

[11] Burakowski T., 2005. System eksploatacji a system techniczny, Radom: *Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksp loatacji*, Problemy Eksploatacji, nr.4, s.7.

[12] Cempel C., 1982. *Drgania mechaniczne – wprowadzenie*, Poznań: Wydawnictwo Politechnika Poznańska.

[13] Cempel C., 1989. *Wibroakustyka stosowana*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[14] Cempel Cz., 2008. *Teoria i Inżynieria Systemów*, Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji.

[15] Cempel Cz., Tomaszewski F., 1992. *Diagnostyka maszyn*, Radom: MCNEMT.

[16] Chrzan P., 1990. *Łańcuchy decyzyjne Markowa i ich zastosowania w ekonomii*, Katowice: Akademia Ekonomiczna.

[17] Chybowski L., 2014. *Ważność elementów w strukturze systemów technicznych*, Szczecin: Studia i Rozprawy ITE.

[18] Cinlar E., 1975. *Introduction to stochastic processes*. New Jersey: Prentice Hall.

[19] Costes J-P., Ko P., Ji T., Decès-Petit C., Altintas Y., 2004. Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process, J Wood, vol. 50, pp.28-34.

[20] Cygan Z., Sienkiewicz P., Wojtczak J., 1994. *Metodologia badań eksploatacji systemów technicznych*, Warszawa: Zakład Systemów Ekonomicznych

[21] Dietrich J., 1985. *System i konstrukcja*, Wydawnictwo WNT, Warszawa.

[22] Downarowicz O., 1997. *System eksploatacji,* Zarządzanie zasobami techniki, Gdańsk - Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji.

[23] Drelichowski L., Bojar W., Żółtowski M., 2012. *Elementy zarządzania eksploatacją maszyn*, Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno–Przyrodniczego w Bydgoszczy.

[24] Dyba W., Stryjakiewicz T., 2014. Inicjatywy klastrowe jako szansa rozwoju przemysłu meblarskiego w Polsce w warunkach kryzysu – przykład Swarzędzkiego Klastra Producentów Mebli, *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*, t. 27, s. 181–196.

[25] Feller W., 1964. On semi-Markov processes, USA: Proc. Nat. Acad. Sci. 51(4), 653-659.

[26] Ficoń K., 2001. *Procesy logistyczne w przedsiębiorstwie*, Gdynia: Impuls Plus Consulting.

[27] Fleming W.H., Soner H.M., 1993. *Controlled Markov processes and viscosity solutions*. New York: Springer-Verlag.

[28] Florek J., Barczak A., 2004. Procesy informacyjno- decyzyjne w eksploatacji obiektów technicznych, *Telekomunikacja i techniki informacyjne*, 1-2/2004, s.33.

[29] Golka M., 1992. *Kultura jako system*, Poznań: Ośrodek Wydawnictw Naukowych.

[30] Gawroński T., 2009. Technological process optimization for the pretreatment of solid wood furniture elements, *Forest Products Journal*, vol. 59(5), pp.63—68.

[31] Gawroński T., 2013. Optimization of CNC routing operations of wooden furniture parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, Issue 9, pp. 2259-2267.

[32] Gołąbek A., 1993. Metodyka badań i oceny niezawodności maszyn w ujęciu systemowym, Szczyrk: *Materiały XXI Zimowej Szkoły Niezawodności*, nt. Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania, s. 93-110.

[33] Girtler J., Ślężak M., 2013: Four-state stochastic model of changes in the reliability states of a motor vehicle, *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, 15 (2), s.156–160.

[34] Grabski F., 1978. *Wybrane zagadnienia procesów stochastycznych*, Gdynia: Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej.

[35] Grabski F., 2002. *Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji*. Warszawa: PAN Instytut Badań Systemowych. Badania Systemowe T. 30.

[36] Grabski F., Jaźwiński J., 2009. *Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki*. Warszawa: WKiŁ.

[37] Grabski F., 2017: The renewal process generated by return times of semi–Markov process in reliability models, *Jurnal of KONBiN* , vol.43, s. 365–380.

[38] Gruszka J., Tytyk E., 2018. Problemy ergonomiczne i jakościowe w różnych fazach istnienia wyrobów technicznych. Poznań: *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, seria: Organizacja i Zarządzanie*, nr. 77, s. 65–83.

[39] Grzynkowicz N., Kowalczyk J., Kusak A., Podgórski Z., Ambroziak M., 2008. *Podstawy funkcjonowania przedsiębiorstw*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe WWZ.

[40] Hall A.D., 1968. *Podstawy techniki systemów*. Ogólne zasady projektowania, Warszawa: PWE.

[41] Hamrol A., 2005. *Zarządzanie jakością z przykładami*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[42] Hamrol A., 2015. *Strategie i praktyki sprawnego działania LEAN, SIX SIGMA i inne*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[43] Haviland R., 1968. *Niezawodność systemów technicznych*, Warszawa: WNT.

[44] Hebda M., Mazur T., Pelc H., 1978. *Teoria eksploatacji pojazdów*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.

[45] Hermann M., Pentek T., Otto B., 2015. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review, *Technische Universität Dortmund*, no. 01.

[46] Honczarenko J., Jardzioch A., 2010. Control and regulation in flexible manufacturing systems, with interference considered, *16th International Symposium on Measurement and Control in Robotics*, Warszawa.

[47] Hossain S.J., Sarker B.R., 2016. Overall Equipment Measures of Engineering Production Systems, Texas, US: Annual Meeting of the Decision Sciences Institute.

[48] Iosifescu M., 1988. *Skończone procesy Markowa i ich zastosowania*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[49] Jaźwiński J., Grabski F., 2003. *Niektóre problemy modelowania systemów transportowych*, Warszawa -Radom: ITE.

[50] Jażwiński J., Ważyńska-Fiok K., 1993. *Bezpieczeństwo systemów*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[51] Juran I.M., Gryna M.F., 1976. *Jakość, projektowanie, analiza*, Warszawa: WNT.

[52] Kamiński J., 1973. Ogólna teoria systemów a prognozowanie, (w): Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk: *Elementy metodologii prognozowania społecznego*, wyd. 3, s. 63.

[53] Karpiński T., 2013. *Inżynieria produkcji*, Warszawa: Wydawnictwo WNT.

[54] Kaźmierczak. J., 2000. *Eksploatacja systemów technicznych*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

[55] Kien W., Osajda M., 2013. ttp://www.biznesmeblowy.pl/produkcja_mebli/116/formatyzerko_czopiarki_wszechstronne_obrabiarki,1004566.html, data dostępu kwiecień 2019

[56] Klir G. J., (red.) 1976. *Ogólna teoria systemów*, Tendencje rozwojowe Warszawa: WNT.

[57] Kosicka E., Mazurkiewicz D., Gola A., 2006, Problemy wspomagania decyzji w systemach utrzymania ruchu, Informatyka, *Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, tom 4, s.49—52.

[58] Kotarbiński T.,1982. *Traktat o dobrej robocie*, Wrocław: Wydawnictwo OSSOLINEUM, Wydanie siódme.

[59] Kotarbiński T., 2003. *Dzieła wszystkie. Prakseologia*, Wrocław: Wydawnictwo OSSOLINEUM.

[60] Kubiaczyk A., Określenie niepewności pomiarów (poradnik laboratorium z fizyki), data dostępu maj 2017.

[61] Legutko S., 2004, *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Warszawa: WSiP.

[62] Lewandowski J., Skołud B., Plinta D., 2014. *Organizacja systemów produkcyjnych*, Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.

[63] Lilley S., 1958. *Ludzie, maszyny i historia*, Warszawa: PWN

[64] Limnios N., Oprisan G., 1999. A unified approach for reliability and performability evaluation of semi-Markov system. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 15, p.353–368.

[65] Limnios N., Oprisan G., 2001: *Semi-Markov Processes and Reliability*. Birkhauser, Boston

[66] Linquist B. H., 2010. On the statistical modelling and analysis of repairable systems, Series on Quality, Singapure: Word Scientific Publishing, *Reliability and Engineering Statistics*, vol. 7.

[67] Loska A., 2011. Przegląd modeli ocen eksploatacyjnych systemów technicznych, Opole: Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, *Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją* , tom 2, s. 37–46.

[68] Loska A.,2010. Modelowy sposób funkcjonowania służb utrzymania ruchu - strategie eksploatacyjne, *Służby Utrzymania Ruchu*, nr 3, s. 58–64.

[69] Loska A.,2013. Exploitation assessment of selected technical objects using taxonomic methods, *Polskie Naukowo -Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne*, vol. 15, no. 1, pp.1–8.

[70] Macha E., 2001. *Niezawodność maszyn*, Opole: Politechnika Opolska.

[71] Macha E., Niesłony A., 2010. *Niezawodność systemów mechatronicznych*, Opole: Politechnika Opolska.

[72] Matuszak Z., 2012. *Badanie rozkładów uszkodzeń systemów siłowni okrętowych*, Szczecin.

[73] Matuszak Z., 2012. Problemy badania eksploatacyjnej niezawodności siłowni okrętowych, Radom: *Problemy Eksploatacji*, nr 1, s.69–78.

[74] Mazur T., Małek A., 1979. *Zarządzanie eksploatacja systemów technicznych*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.

[75] Mączyński W., 2011. Wskaźniki OEE, MTBF i MTTR- czy to coś więcej niż wartości bezwzględne, Zarządzanie, *Utrzymanie Ruchu*, nr 1.

[76] Migalski J.,(red), 1992. *Inżynieria Niezawodności*, Praca zbiorowa Warszawa: ART.

[77] Migawa K., 2004. *Model oceny i sterowania gotowością w systemie transportowym*, Monografia pod red. A. Januszewskiego i L. Drelichowskiego pr. Metody, narzędzia i systemy informatyczne w zarządzaniu organizacjami gospodarczymi, Bydgoszcz.

[78] Młyńczak M., 2012. *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

[79] Mueller J.P., 1996. The design of intelligent agents: a layered approach, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.117, Heildelberg, Springer Verlag.

[80] Muhlemann A., Oakland J., Lockyer K., 1997. *Zarządzanie, Produkcja i Usługi*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

[81] Mutingi M., Mbohwa Ch., Kommula V P., 2016. Multi-criteria reliability optimization for a complex system with a bridge structure in a fuzzy environment: A fuzzy multicriteria genetic algorithm approach, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 18 (3), pp. 450—456.

[82] Nakajima S., 1988. *Introduction to TPM*, Portland: Productivity Press.

[83] Niziński S., 2000, *Elementy eksploatacji obiektów technicznych*, Olsztyn: UWM.

[84] Niziński S., 2002. *Eksploatacja obiektów technicznych*, Warszawa–Sulejówek–Olsztyn–Radom: Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji.

[85] Niziński S., 2007. *Utrzymanie pojazdów i maszyn*, Olsztyn: Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji, red. S. Niziński, R. Michalski.

[86] Norma PN-EN 15341:2007, Maintenance - Maintenance Key Performance

[87] Oziemski S., 1999. *Efektywność Eksploatacji Maszyn*: Podstawy Techniczno-Ekonomiczne, Radom: Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji.

[88] Pabis S., 2009. *Metodologia Nauk Empirycznych*, Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.

[89] Paska, J. Marchel, M. 2016. Wykorzystanie metod procesów Makowa i semi-Markowa w analizie niezawodności elementów i systemów. Warszawa: *Wydawnictwo Politechnika Warszawska*, http://marie-www.ee.pw.edu.pl/~marchelp/files/BEiNZ-cw4.pdf (dostęp 24.03.2019).

[90] PN-EN IS0 9000:2006, System Zarządzania Jakością –Podstawy i Terminologia

[91] Pourjavad E., Shirouyehzad H., Shahin A.,2011. Analyzing RCM Indicators in Continuous Production Lines A Case Study, International Business Research, vol. 4

[92] Pszczołowski T., 1977. Celowość, skuteczność, efektywność, Prakseologia, Wrocław: PWN, nr. 3.

[93] Ratnayake R.M.C., 2013. Plant Systems and Equipment Maintenance: Use of Fuzzy Logic for Criticality Assessment in NORSOK Standard Z-008, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, pp.1468–1472.

[94] Rzeźnik Cz., Durczak K., Rybacki P., 2015, *Serwis techniczny maszyn*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.

[95] Sadowski W., 1978. *Podstawy ogólnej teorii systemów*, Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN.

[96] Shipside S., 2009. Karol Marks Kapitał, *Współczesne interpretacje klasycznej ekonomii*, Warszawa: Wydawnictwo Studio Emka.

[97] Słowiński B., 2010. *Inżynieria Eksploatacji Maszyn*, Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane, Politechnika Koszalińska.

[98] Słowiński B., 2002. *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*, Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane, Politechnika Koszalińska.

[99] Słownik języka polskiego PWN, 1996. Warszawa.

[100] Szopa T., 2016. *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[101] Szwedzka K., Jasiulewicz–Kaczmarek M., 2016. Determining Maintenance services using production performance indicators, *Research in Logistic & Production*, vol. 6, no.4, pp. 361—374.

[102] Szwedzka K., Lubiński P., Jasiulewicz-Kaczmarek M., 2014. Redukcja czasu przezbrojeń metodą SMED – Studium przypadku, Instytut Logistyki i Magazynowania, *Logistyka*.

[103] Szwedzka, K., Szafer, P., Wyczółkowski R., 2017. Structural analysis of factors affecting the effectiveness of complex technical systems, Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), 8-9 November 2017, Madrid, Spain. Ed. Khalid S. Soliman. [B.m.] : *International Business Information Management Association*, pp. 4096–4105.

[104] Tabaszewski M., Teoria i Inżynieria Systemów, ///C:/Users/Toshiba/Downloads/Teoria%20systemw.pdf, data dostępu 10.02.2019.

[105] Tarałkiewicz W., 1976. *O doskonałości*, Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN.

[106] Tarełko W., 2011. *Metodologia projektowania właściwości eksploatacyjnych złożonych obiektów technicznych*, Gdynia: Biblioteka Problemów Eksploatacji.

[107] Tytyk E., Butlewski M., 2008. *Wprowadzenie do techniki*, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

[108] Vorne Industries Inc. Defining World-Class, https://www.oee.com/world-class-oee.html, data pobrania: marzec 2019.

[110] Zammori F., Braglia M., Frosolini M., 2011. Stochastic overall equipment effectiveness, *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 21(1)2, pp. 6469–6490.

[111] Zółtowski B., 2012. *Doskonalenie systemów eksploatacji maszyn, Problemy eksploatacji*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - Państwowego Instytutu Badawczego, Problemy Eksploatacji, nr.2, s.7–20.

[112] Żółtowski B, 1996. *Podstawy Diagnostyki Maszyn*, Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane ART.

[113] Żółtowski M., Kołaczyński T., 2011. *Poszukiwanie dróg racjonalnej eksploatacji maszyn*, Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedza, nr 48, s.162—176.

[114] Żółtowski B., Niziński S., 2002. *Modelowanie procesów eksploatacji maszyn*, Bydgoszcz-Sulejówek: Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy.

[115] Żółtowski B., Tylicki H., 2008. *Elementy diagnostyki technicznej maszyn*, Piła: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa.

[116] Żółtowski J., 2004. *Wybrane Zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Spis tabel

Tabela 2.1 Wybrane definicje systemu. *(Źródło: Opracowanie własne na podstawie Bertalanffy, 1984; Pabis, 2009; Hall, 1968; Klir, 1976; Golka, 1992; Kamiński 1973; Białyszewski, 1972; Cempel, 2008; Matuszak, 2012; Żółtowski, 2004)* 20

Tabela 2.2. Wybrane definicje niezawodności. *(Źródło: Opracowanie własne na podstawie Bobrowski, 1985; Tarełko, 2011; Niziński 2002; Macha, 2001; Ważyńska–Fiok i Jaźwiński, 1990; Żółtowski, 2004; Legutko, 2004; Szopa, 2016, Żółtowski, 1996;Rzeżnik i in., 2015)* ... 25

Tabela 2.3. Wybrane definicje eksploatacji. (*Źródło: Opracowanie na podstawie: Młyńczak, 2012*)..... 38

Tabela 2.4. Klasyfikacja opisów uszkodzenia według różnych kryteriów. (*Źródło: opracowano na podstawie: Legutko, 2004*) 43

Tabela 2.5. Klasyfikacja wybranych miar niezawodności. (*Źródło: opracowano na podstawie: Chybowski, 2011*) 54

Tabela 2.6. Struktury wskaźników KPI. (*Źródło: opracowano na podstawie: PN-EN 15341:2007*) 56

Tabela 2.7. Wykaz niektórych miar określonych przez normę. (*Źródło: opracowano na podstawie: Loska,2011*) 57

Tabela 3.1. Zakres parametrów obsługowych podajnika i odbiornika przeznaczonych do produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*)..... 86

Tabela 3.2. Liczba cykli pracy na minutę. (*Źródło: opracowanie własne*) 87

Tabela 3.3. Zakres możliwości obsługi elementów poddanych obróbce dla stacji obracania. *(Źródło: opracowanie własne)* 91

Tabela 3.4. Rozkład kosztów alokowanych do centrów obróbczych w 4 wybranych przedsiębiorstwach – wartości dla 1 minuty pracy. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstw*) 95

Tabela 3.5. Przykładowe wartości wskaźnika OEE dla złożonych systemów technicznych (ZST) w wybranych przedsiębiorstwach. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstw*) 97

Tabela 3.6. Przykład wartości wskaźników: MTTR, MTTF, MTBF z okresu jednego roku dla wybranego centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstw)* 98

Tabela 3.7. Przykładowe zestawienie kodów wraz z interpretacją. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa*) 100

Pozyskana wiedza o sposobach zapisu informacji o występujących przestojach, umożliwiła autorowi na wyszczególnienie zapisanych informacji o mikro–awariach oraz awariach trwających powyżej 10 minut (rozdz. 3.3.4). 100
Tabela 3.8. Opis kodów stosowanych przez przedsiębiorstwo. *(Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa)* 101
Tabela 3.9. Charakterystyka kategorii przestojów. (*Źródło: opracowanie własne*) 102
Tabela 3.10. Przykład mikro–przestojów zarejestrowanych przez operatorów przedsiębiorstwa. (*Źródło: opracowanie własne*) 103
Tabela 3.11. Wartości wskaźników MTTR, MTTF, MTBF za okres jednego roku dla wybranego centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie założeń z tabeli 3.6*) 103
Tabela 4.1. Zapis realizacji planu w systemie. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstwa*) 110
Tabela 4.2. Raport czasów przestojów centrum obróbczego. (*Źródło: opracowanie własne*) 111
Tabela 4.3. Zapis czasów awarii oraz dopasowanie do produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*) 112
Tabela 4.4. Przykład sumarycznego zestawienia czasów i liczby awarii występującej każdego dnia. (*Źródło: opracowanie własne*) 113
Tabela 4.5. Występowanie naprzemiennie stanów zdatności i niezdatności złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 115
Tabela 4.6. Liczba występujących awarii dla poszczególnych elementów złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 120
Tabela 4.7. Parametry oraz postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa czasu zdatności elementów badanego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 128
Tabela 4.8. Postać funkcji prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów. (*Źródło: opracowanie własne*) 131
Tabela 4.9. Momenty pierwszego rzędu dla poszczególnych elementów systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 133
Tabela 4.10. Momenty drugiego rzędu dla poszczególnych elementów systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 134
Tabela 4.11. Udział elementów w 3 grupach wagowych dla kolejnych lat finansowych z uwzględnieniem wymiany asortymentu na przełomie lat. (*Źródło: opracowanie własne*) ... 138

Spis rysunków

Rysunek 1.1. Algorytm pozyskiwania danych o złożonych systemach technicznych (*Źródło: opracowanie własne na podstawie: Żółtowski, 1996*) 16
Rysunek. 2.1. Przykładowe elementy systemu. (*Źródło: opracowanie na podstawie: Tarełko, 2011*)..... 18
Rysunek 2.2. Graficzna interpretacja systemu. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie: Tarełko, 2011*) 19
Rysunek 2.3. Model maszyny: a) klasyczny, b)współczesny (*Źródło: opracowano na podstawie: Słowiński, 2010*)..... 22
Rysunek 2.4. Przykładowa funkcja niezawodności. (*Źródło: opracowano na podstawie: Macha, 2001*) 27
Rysunek 2.5. Przykładowa funkcja ryzyka. (*Źródło: opracowano na podstawie: Macha, 2001*) 28
Rysunek 2.6. Schemat systemu o strukturze szeregowej. (*Źródło: opracowano na podstawie Grabski i Jaźwiński, 2009*)..... 33
Rysunek 2.7. Schemat systemu o strukturze równoległej. (*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*)..... 33
Rysunek 2.8. Schemat systemu o strukturze równoległo–szeregowej. (*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*) 34
Rysunek 2.9. Schemat systemu o strukturze szeregowo–równoległej. (*Źródło: opracowano na podstawie: Grabski i Jaźwiński, 2009*) 35
Rysunek 2.10. Cykl życie obiektu technicznego. (*Źródło: opracowano na podstawie: Tarełko, 2011*)..... 36
Rysunek 2.11 System eksploatacji jako układ działania. (*Źródło: opracowano na podstawie: Młyńczak, 2012*) 42
Rysunek 2.12. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn ASEM. (*Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski, 2012*) 46
Rysunek 2.13. Czynniki kształtujące efektywność systemu technicznego. (*Źródło: opracowano na podstawie: Brandowski, 1990*)..... 50
Rysunek 2.14. Pozyskiwanie danych eksploatacyjnych. (*Źródło: opracowano na podstawie: Młyńczak, 2012*) 51

Rysunek 2.15. Graficzna interpretacja wskaźnika średniego czasu pomiędzy awariami. (*Źródło opracowanie własne na podstawie: Szwedzka i in., 2017*) 58
Rysunek 2.16. Koncepcja modelowania rzeczywistości eksploatacyjnej. (*Źródło: opracowano na podstawie: Niziński, 2000*) 63
Rysunek 2.17. Klasyfikacja modeli procesów obiektów technicznych. (*Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski i Niziński, 2002*) 64
Rysunek 2.18. Modele matematyczne w eksploatacji. *(Źródło: opracowano na podstawie: Żółtowski i Niziński, 2002)* 66
Rysunek 2.19 Podział metod obliczeń niezawodnościowych. (*Źródło: opracowano na podstawie: Paska i Marchel, 2016*)..... 69
Rysunek 3.1. Hala produkcyjna zakładu produkującego meble. (*Źródło: fotografia z dokumentów przedsiębiorstwa*) 80
Rysunek 3.2. Przebieg procesu produkcji mebli skrzyniowych (wejście: 81
1. szlifierka, 2. frezarko–czopiarka, 3. wiertarka przelotowa, 4. automatyczne pistolety natryskowe, 5. linia UV, 6. linia pakowania : wyjście). (*Źródło: opracowanie własne: na podstawie materiałów przedsiębiorstwa*) 81
Rysunek 3.3. Przykład realizacji procesu technologicznego. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z przedsiębiorstwa*) 83
Rysunek 3.4. Przykład centrum obróbczego sterowanego numerycznie, wykorzystywanego w dużych przedsiębiorstwach produkcji mebli – jako złożony system techniczny o strukturze szeregowej. (*Źródło: opracowanie własne*) 85
Rysunek 3.5. Automatyczny podajnik i odbiornik. (*Źródło: fotografia własna i materiały z przedsiębiorstwa*) 85
Rysunek 3.6. Frezarko–czopiarka. (*Źródło: fotografia własna za zgodą przedsiębiorstwa*) .. 88
Rysunek 3.7. Maszyna bazowa. (*Źródło: materiały z przedsiębiorstwa*) 89
Rysunek 3.8. Agregat dokładnego frezowania..... 89
(*Źródło: opracowanie na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 89
Rysunek 3.9. Przebieg procesu skrawania przedniej i tylnej krawędzi elementu. (*Źródło: opracowano na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 90
Rysunek. 3.10. Agregat szlifujący. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 90
Rysunek 3.11. Proces obracania elementu o kąt 90^{o}. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 91

Rysunek 3.12. Przykład wiertarki przelotowej. (*Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 92
Rysunek 3.13. Odmiany obróbki otworów oraz osadzenie wierteł w głowicy do wiercenia drewna. (*Źródło: fotografia własna i na podstawie dokumentów przedsiębiorstwa*) 93
Rysunek 3.14. Występowanie mikro–awarii w wyniku masy produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*) 105
Rysunek 3.15. Występowanie mikro–awarii w wyniku liczby produkowanych elementów. (*Źródło: opracowanie własne*) 106
Rysunek 4.1. Graf zmian stanów procesów. (*Źródło: opracowanie własne*) 117
Rysunek 4.2. Realizacja procesu eksploatacji badanego systemu technicznego Wt: $t \geq 0$: S_0 – stan zdatności, S_1 – stan niezdatności frezarko-czopiarki, S_2 – stan niezdatności odbiornika/RBO, S_3 – stan niezdatności podajnika, S_4 – stan niezdatności transportera, S_5 – stan niezdatności wiertarki. (*Źródło: opracowanie własne*) 121
Rysunek 4.3. Histogram obserwacji bezawaryjnej pracy frezarko–czopiarki. (*Źródło: opracowanie własne*) 122
Rysunek 4.4. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy odbiornika (RBO). (*Źródło: opracowanie własne*) 123
Rysunek 4.5. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy podajnika. (*Źródło: opracowanie własne*) 123
Rysunek 4.6. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy transportera. (*Źródło: opracowanie własne*) 124
Rysunek 4.7. Histogram obserwacji czasu bezawaryjnej pracy wiertarki. (*Źródło: opracowanie własne*) 124
Rysunek 4.8. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności frezarko-czopiarki. (*Źródło: opracowanie własne*) 125
Rysunek 4.9. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności odbiornika/RBO. (*Źródło: opracowanie własne*) 126
Rysunek 4.10. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności podajnika. (*Źródło: opracowanie własne*) 126
Rysunek 4.11. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności transportera. (*Źródło: opracowanie własne*) 127
Rysunek 4.12. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności wiertarki. (*Źródło: opracowanie własne*) 127

Rysunek 4.13. Zestawienie gęstości prawdopodobieństwa czasów zdatności elementów złożonego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 129
Rysunek 4.14. Zależność funkcji prawdopodobieństwa zmiany stanu ze zdatnego na niezdatny poszczególnych elementów rozpatrywanego systemu technicznego od czasu. (*Źródło: opracowanie własne*)..... 130
Rysunek 4.15. Zestawienie funkcji prawdopodobieństwa przejścia ze stanu zdatności rozpatrywanego systemu technicznego do stanu jego niezdatności spowodowanego awarią poszczególnych jego elementów. *(Źródło: opracowanie własne)* 132
Rysunek 4.16. Przebieg wyznaczonych funkcji niezawodności i zawodności badanego systemu technicznego. (*Źródło: opracowanie własne*) 135
Rysunek 4.17. Dystrybuanty masy w zależności od wystąpienia awarii technicznej. (*Źródło: opracowanie własne*)..... 136
Rysunek 4.18. Wykres udziału produkowanych elementów w trzech grupach wagowych. (*Źródło: opracowanie własne*) 139