

Politechnika Wroclawska
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Zakład Logistyki i Systemów Transportowych

Rozprawa doktorska

**Model systemu wsparcia logistycznego
procesu zagospodarowania obiektów
wycofanych z eksploatacji
Raport serii: PRE nr 3/2010**

Marcin Plewa

Promotor:

Dr hab. inż. T. Nowakowski, Prof. nadzw. PWt.

Słowa kluczowe:
system wsparcia logistycznego
zagospodarowanie obiektów wycofanych z eksploatacji
logistyka zwrotów
modele utrzymania zapasów

Opracowanie modelu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji, uwzględniającego obiekty wycofane przed upływem określonego czasu od chwili rozpoczęcia procesu eksploatacji wymaga uwzględnienia zależności pomiędzy wielkością zapotrzebowania na nowe obiekty a liczbą obiektów wycofanych z eksploatacji. Rozprawa zawiera model analityczny oraz model symulacyjny. W pracy przeprowadzono analizę wrażliwości modelu oraz jego weryfikację w oparciu o dane rzeczywistego systemu.

Wrocław, 2010

Spis ważniejszych oznaczeń:	4
1. Logistyka funkcjonowania systemu odzysku.....	7
1.1. Modele utrzymania zapasów w logistyce systemów odzysku	16
1.1.1. Modele deterministyczne	16
1.1.2. Modele stochastyczne	33
1.2. Podsumowanie literatury	53
2. Cel i zakres pracy	55
3. Model systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji	56
3.1. Metoda prognozowania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji.....	60
3.1.1. Liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji opisana funkcją ciągłą	62
3.1.2. Liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji opisana funkcją dyskretną	66
3.2. Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu	72
4. Analiza wrażliwości analitycznego modelu systemu wsparcia logistycznego	75
4.1. Analiza wrażliwości modelu prognostycznego.....	75
4.1.1. Intensywność uszkodzeń obiektów technicznych	78
4.1.2. Współczynnik $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_{a^b}}}$	84
4.2. Analiza wrażliwości modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji.....	86
4.2.1. Poziom informacyjny	93
4.2.2. Dopuszczalny czas do uszkodzenia.....	99
4.2.3. Wielkość partii odzysku	104
4.2.4. Wielkość partii produkcyjnej	109
4.2.5. Czas przeglądu	115
5. Symulacyjny model systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji.....	118
5.1. Algorytm procesu symulacji	125
6. Analiza zgodności modelu symulacyjnego z wynikami uzyskanymi analitycznie.....	129
7. Analiza wrażliwości symulacyjnego modelu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji.....	135

7.1. Parametry charakteryzujące obiekt techniczny pracujący w systemie eksploatacji	135
7.1.1. Parametr skali rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu	135
7.1.2. Parametr kształtu rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu	138
7.2. Parametry charakteryzujące system wsparcia logistycznego.....	140
7.2.1. Parametry polityki zaopatrzenia.....	140
7.2.2. Parametry ekonomiczne systemu wsparcia logistycznego.....	162
8. Weryfikacja modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji.....	164
8.1. Opis rzeczywistego systemu	164
8.2. Analiza zgodności danych rzeczywistych oraz uzyskanych w procesie symulacji	168
9. Podsumowanie i wnioski.....	175
Literatura	178

Spis ważniejszych oznaczeń:

- D - stała wielkość zapotrzebowania na wyroby finalne w jednostce czasu
- $D(t)$ - wielkość zapotrzebowania na wyroby finalne w chwili t
- D_T - wielkość zapotrzebowania na wyroby finalne w okresie T
- Z - stała liczba zwrotów w jednostce czasu
- $Z(t)$ - liczba zwrotów w chwili t
- Z_T - liczba obiektów zwróconych do systemu w okresie T
- H - rozmiar horyzontu planowania
- T_c - czas cyklu (czas pomiędzy kolejnymi dostawami partii produkcyjnych lub zakupowych)
- T_U - czas cyklu unieszkodliwiania (okres, w którym wszystkie produkty zwracane do systemu odzysku są unieszkodliwiane)
- T_R - czas cyklu odzysku (okres, w którym zapotrzebowanie pokrywane jest produktami procesu odzysku)
- T_P - czas cyklu produkcji (okres, w którym zapotrzebowanie pokrywane jest z procesu produkcji)
- T_M - okres magazynowania zwrotów (okres, w którym nie są uruchamiane procesy odzysku i zwrócone produkty są wyłącznie składowane)
- T_{WR} - czas zużycia partii odzysku (okres, po którym następuje wyczerpanie zapasu w magazynie wyrobów finalnych)
- T_{zam} - czas realizacji procesu zakupu
- T_{odz} - czas realizacji procesu odzysku
- T_{prod} - czas realizacji procesu produkcji
- m - liczba uruchomień procesu odzysku w trakcie jednego cyklu
- n - liczba uruchomień procesu produkcji (zakupu) w trakcie jednego cyklu
- o - liczba zamówień nowego surowca w trakcie jednego cyklu
- W_{odz} - wydajność procesu odzysku
- W_{prod} - wydajność procesu produkcji
- Q_{zam} - stała wielkość partii zakupowej

- $Q_{zam}(t)$ - wielkość partii zakupowej w trakcie realizacji w chwili t
- $Q_{zam,T}$ - wielkość partii zakupowej w okresie T
- Q_{zams} - wielkość partii zakupowej nowego surowca
- Q_{prod} - stała wielkość partii produkcyjnej
- $Q_{prod}(t)$ - wielkość partii produkcyjnej w trakcie realizacji w chwili t
- $Q_{prod,T}$ - wielkość partii produkcyjnej w okresie T
- Q_{odz} - stała wielkość partii odzysku
- $Q_{odz}(t)$ - wielkość partii odzysku w trakcie realizacji w chwili t
- $Q_{odz,T}$ - wielkość partii odzysku w okresie T
- Q_u - stała wielkość partii w procesie unieszkodliwiania
- $Q_u(t)$ - wielkość partii w procesie unieszkodliwiania w trakcie realizacji w chwili t
- $Q_{u,T}$ - wielkość partii w procesie unieszkodliwiania w okresie T
- Q_t - wielkość partii transportowej
- $Q_t(t)$ - wielkość partii transportowej w chwili t
- $TQ_{zam}(t)$ - skumulowana wielkość zamówień w chwili t
- $TQ_{prod}(t)$ - skumulowana wielkość produkcji w chwili t
- $TQ_{odz}(t)$ - skumulowana wielkość odzysku w chwili t
- $TQ_u(t)$ - skumulowana liczba unieszkodliwianych obiektów w chwili t
- B - stała wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych
- $B(t)$ - liczba produktów, które w chwili t posiadają status zleceń oczekujących
(wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych w chwili t)
- $B_{o,T}$ - liczba produktów, które w okresie T posiadają status zleceń oczekujących
- B_T - wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych w okresie T
- $I_{poz}(t)$ - stan zapasu dysponowanego w magazynie wyrobów finalnych w chwili t
- $I_{poz,T}$ - stan zapasu dysponowanego w magazynie wyrobów finalnych w okresie T
- $I_z(t)$ - zapas dostępny w magazynie zwrotów w chwili t
- $I_{z,T}$ - zapas dostępny w magazynie zwrotów w okresie T

- $I_{np}(t)$ - zapas dostępny w magazynie wyrobów finalnych w chwili t
- $I_{np,T}$ - zapas dostępny w magazynie wyrobów finalnych w okresie T
- K_{zam} - stały koszt uruchomienia procesu zakupu
- K_{prod} - stały koszt uruchomienia procesu produkcji
- K_{odz} - stały koszt uruchomienia procesu odzysku
- K_{zams} - stały koszt realizacji procesu zakupu nowego surowca
- K_{pprod} - koszt przebrojenia linii produkcyjnej z odzysku na produkcję
- K_{podz} - koszt przebrojenia linii produkcyjnej z produkcji na odzysk
- k_{skz} - jednostkowy koszt składowania zwrotów
- k_{sknp} - jednostkowy koszt składowania nowych produktów
- k_r - jednostkowy koszt procesu odzysku
- k_p - jednostkowy koszt procesu produkcji
- k_{zam} - jednostkowy koszt procesu zakupu
- k_u - jednostkowy koszt procesu unieszkodliwiania
- k_t - jednostkowy koszt transportu
- k_b - jednostkowy koszt braku w zapasie wyrobów finalnych (koszt obsługi zlecenia oczekującego)
- k_{sks} - koszt składowania surowców

1. LOGISTYKA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU ODZYSKU

Do niedawna systemy logistyczne zajmowały się wyłącznie wspieraniem działań realizowanych w ramach klasycznego przepływu materiałów od wytwórcy do finalnego odbiorcy. Obecnie następuje wyraźny wzrost zainteresowania optymalizacją procesów logistycznych wspierających procesy odzysku wartości z obiektów wycofanych z eksploatacji.

Obszar logistyki, który swoim zakresem obejmuje proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji jest w literaturze anglojęzycznej określany jako *reverse logistics*.

Pierwsza znacząca definicja *reverse logistics* została sformułowana przez Council of Logistics Management na początku lat 90. Definicja ta tłumaczyła *reverse logistics* jako termin używany w odniesieniu do roli jaką odgrywa logistyka w procesach recyklingu i unieszkodliwiania odpadów oraz zarządzaniu materiałami niebezpiecznymi.

Kolejną definicję *reverse logistics* sformułowali Pohlen oraz Farris. Autorzy uważają, że *reverse logistics* obejmuje „(...) *przenoszenie dóbr od klienta do producenta (...)*”.

W roku 1993 Kopicky przedstawił definicję będącą syntezą wcześniejszych prac. Uznał *reverse logistics* jako ogólny termin związany z logistycznym zarządzaniem toksycznymi oraz nietoksycznymi odpadami pochodzącymi z opakowań i produktów, obejmujący proces dystrybucji zwrotnej [15, 143].

Pod koniec lat 90 Rogers i Tibben-Lembke opisali Reverse Logistics jako: „(...) *proces obejmujący planowanie oraz kontrolę przepływu materiałów, zapasów w toku, dóbr finalnych oraz powiązanych z nimi informacji z miejsca ich konsumpcji do miejsca ich powstania, w celu odzyskania wartości lub właściwego sposobu ich unieszkodliwienia*”[122].

Powyższa definicja została rozwinięta przez europejską grupę naukowców (RevLog) zajmujących się Reverse Logistics. Przedstawiono Reverse Logistics jako „(...) *proces obejmujący planowanie oraz kontrolę przepływu materiałów, zapasów w toku, dóbr finalnych oraz powiązanych z nimi informacji z miejsca ich wytworzenia, dystrybucji lub konsumpcji do miejsca, w którym następuje odzyskanie wartości lub właściwy sposób ich unieszkodliwienia*”. Przedstawiona definicja obejmuje produkty, które nie były użytkowane. Przykładem mogą być niewykorzystane zapasy magazynowe. Umożliwia również realizację procesów odzysku przez dowolne podmioty [15].

Reverse Logistics jest również definiowane jako *ogół działań logistycznych związanych z transformacją produktów, które przestały mieć wartość dla użytkownika, w produkty, które mogą zostać ponownie wykorzystane* [29].

W polskiej literaturze funkcjonuje kilka równoważnych określeń odpowiadających reverse logistics takich jak: logistyka zwrotów, logistyka odzysku, logistyka odwrotna, logistyka utylizacji, ekologistyka oraz logistyka zwrotna [143].

Pojęcie ekologistyka została zdefiniowana przez Z. Korzenia w pracy [83] jako „*zintegrowany system, który:*

- *opiera się na koncepcji zarządzania recykulacyjnymi przepływami strumieni materiałów odpadowych w gospodarce oraz przepływami sprzężonych z nimi informacji;*
- *zapewnia gotowość i zdolność efektywnego gromadzenia, segregacji, przetwarzania oraz ponownego wykorzystania odpadów według przyjętych zasad technicznych i procesowych, spełniających wymogi normowe i prawne ochrony środowiska;*
- *umożliwia podejmowanie technicznych i organizacyjnych decyzji w kierunku zmniejszania (minimalizacji) tych negatywnych skutków oddziaływania na środowisko, które towarzyszą realizacji procesów zaopatrzeniowych, przetwórczych, produkcyjnych, dystrybucyjnych i serwisowych w logistycznych łańcuchach dostaw”.*

Definicja ekologistyki zaproponowana przez Z. Korzenia została przedstawiona również w pracy [84] w odniesieniu do zużytych opakowań.

Należy jednak zauważyć, że umieszczone w definicji ekologistyki stwierdzenie, że *umożliwia zmniejszenie tych negatywnych skutków oddziaływania na środowisko, które towarzyszą realizacji procesów logistycznych*, nie mieści się w obszarze przedstawionych definicji reverse logistics.

W pracy [124] autor tłumaczy logistykę zwrotną jako „*dziedzinę logistyki zajmującą się badaniem prawidłowości związanych z przepływami produktów, których cykl życia zakończył się. Stanowią one zatem odpady i w tym kontekście logistyka zwrotna może być postrzegana jako nowa forma usuwania odpadów oparta na dwóch kategoriach przesłanek – ekologicznych oraz ekonomicznych, które wzajemnie się uzupełniają”.*

W pracy [143] autor opierając się na publikacjach autorów polskich [2, 3, 37, 83] oraz zagranicznych definiuje logistykę zwrotną jako „*ogół procesów zarządzania przepływami odpadów (w tym produktów uszkodzonych) i informacji (związanych z tymi przepływami), od miejsc ich powstawania (pojawiania się), do miejsca ich przeznaczenia w celu odzyskania wartości (poprzez naprawę, recykling lub przetworzenie) lub właściwego ich unieszkodliwienia i długoterminowego składowania w taki sposób, by przepływy te były efektywne ekonomicznie i minimalizowały negatywny wpływ odpadów na środowisko naturalne człowieka”.*

Opierając się na przedstawionej literaturze zdecydowano, że w dalszej części pracy „ogół procesów zarządzania przepływem surowców, półproduktów, zapasów w toku, wyrobów finalnych (w tym produktów uszkodzonych) oraz obiektów wycofanych z eksploatacji i powiązanych z nimi informacji z miejsca ich wytworzenia, dystrybucji lub użytkowania do miejsca, w którym następuje odzyskanie wartości lub właściwy sposób ich unieszkodliwienia” określany będzie terminem logistyki zwrotów. Natomiast przemieszczane surowce, półprodukty, zapasy w toku, wyroby finalne (w tym produkty uszkodzone) oraz obiekty wycofane z eksploatacji będą określane jako zwroty.

Rodzaje procesów odzysku zdefiniowano na podstawie klasyfikacji przedstawionej w pracy [149] oraz załącznika nr 5 do ustawy o odpadach [151]. Na podstawie wymienionych publikacji można wyróżnić następujące rodzaje odzysku:

- bezpośrednie ponowne wykorzystanie (*direct reuse/resale*),
- naprawa (*repair*),
- odnowienie (*refurbish*),
- przetworzenie (*remanufacturing*),
- kanibalizm (*cannibalization*),
- recykling (*recycling*),
- inne niewymienione, a zawarte w załączniku nr 5 do ustawy o odpadach (Dz.U.2001.62.628).

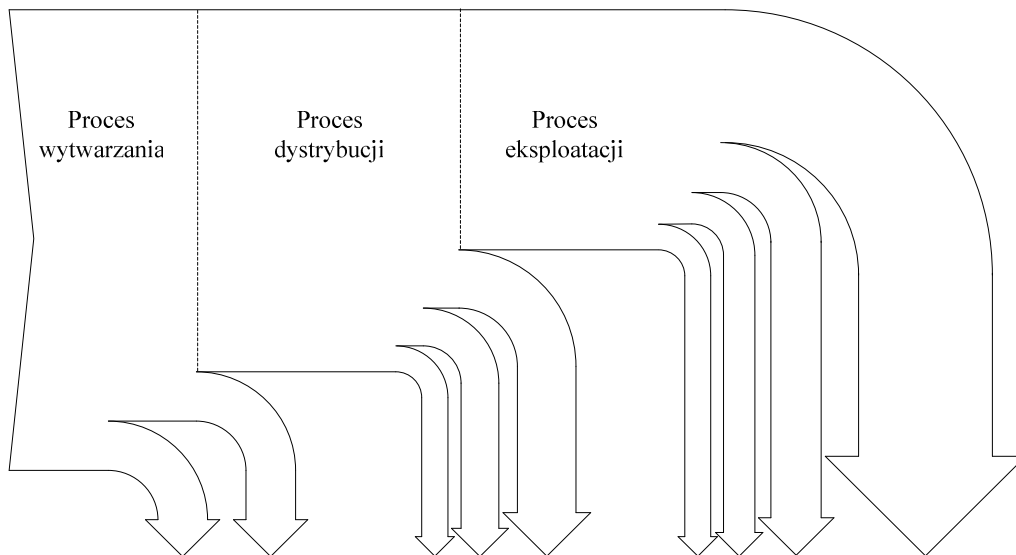
Opis sposobów odzysku wartości przedstawiono w pracach [29, 40, 83, 122, 143, 149, 151]. Kanibalizm jako metodę utrzymania systemu technicznego omawiają prace [27, 28, 47, 48, 95, 106, 128, 127, 134]. Dokładny przegląd prac poświęconych tej metodzie utrzymania systemu technicznego został opublikowany w [103].

W przedstawionej definicji logistyki zwrotów zrezygnowano z wykorzystania pojęcia odpady, gdyż zgodnie z komunikatem Komisji Rady i Parlamentu Europejskiego w sprawie Komunikat wyjaśniający dotyczący odpadów i produktów ubocznych (COM/2007/0059 końcowy) „(...) zbędne materiały z pierwotnego procesu produkcyjnego lub materiały wymagające tylko kosmetycznych zmian, które są zasadniczo podobne do produktu pierwotnego, takie jak masa kauczukowa i mieszanka wulkanizacyjna, wióry i elementy z korka, resztki z tworzyw sztucznych i podobne materiały, mogą być uznawane za produkty uboczne. By tak było, musi istnieć możliwość ich bezpośredniego ponownego wykorzystania albo w pierwotnym procesie produkcyjnym lub w innym zintegrowanym procesie produkcyjnym, w którym ponowne wykorzystanie jest również pewne. Materiały tego rodzaju

można uznać za niespełniające definicji odpadów” [167]. Zgodnie z powyższym postanowieniem wykorzystanie w definicji pojęcia odpady może wykluczać niektóre obiekty, wobec których byłoby możliwe przeprowadzenie zdefiniowanych powyżej rodzajów odzysku.

W oparciu o przedstawioną definicję logistyki zwrotów oraz przestudiowaną literaturę [np. 5, 15, 29, 122, 149, 143] możliwe jest zdefiniowanie zakresu logistyki zwrotów, który obejmuje następujące produkty (rys. 1.1):

- zwroty surowców, półproduktów oraz produktów finalnych z fazy produkcji (nadwyżki surowców, wadliwe produkty odrzucone przez kontrolę jakości, produkty uboczne oraz odpady powstające w procesie produkcyjnym);
- zwroty produktów i opakowań z fazy dystrybucji (produkty uszkodzone w procesie transportu, opakowania wielokrotnego użytku, nadwyżki magazynowe produktów finalnych oraz niesprzedane produkty);
- obiekty wycofane z eksploatacji (niebędące odpadami wg [151] zwroty produktów przez użytkownika spowodowane zmianą decyzji zakupowej lub wadą jakościową, części zamienne wymienione w procesie obsługi obiektów technicznych, uszkodzone obiekty techniczne, których naprawa była niemożliwa, zwroty produktów po skończonym okresie użytkowania i inne oraz odpady) .



Rys. 1.1. Schemat przepływu materiałów w systemie logistyki zwrotów

Źródło: Opracowanie własne

Wdrożenie systemu logistyki zwrotów na poziomie przedsiębiorstwa może przynosić bezpośrednie korzyści wynikające między innymi ze zmniejszenia zużycia surowców, gdyż wykorzystywane są surowce lub komponenty pochodzące z odzysku. Innym czynnikiem decydującym o rozwoju systemów zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji są regulacje prawne. W wielu krajach Europy można dostrzec wzrost liczby wydawanych rozporządzeń związanych z ochroną środowiska. Po przystąpieniu do struktur unijnych Polska została zobligowana do przyjęcia dyrektyw wymuszających odpowiednie postępowanie z odpadami. Ustanawiane są normy dotyczące procesu recyklingu, regulacje związane z postępowaniem ze zużytymi opakowaniami, a także przepisy narzucające na wytwórców odpowiednie zachowanie w stosunku do zwracanych produktów. Przykładem może być wspomniana powyżej ustawa o odpadach. Pod olbrzymią presją ze strony przepisów prawnych znalazły się przede wszystkim przemysł motoryzacyjny oraz elektroniczny [76, 88, 89, 152, 153]. W ostatnich latach pojawił się dodatkowy czynnik rozwoju opisywanych systemów logistycznych - wzrastająca świadomość ekologiczna konsumentów.

Zgodnie z powyższym rozumowaniem, wdrożenie systemu logistyki zwrotów może być postrzegane jako element zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstwa, które ma zapewnić wydajne wykorzystanie całej wartości zawartej w produkcie. Motywatory wdrożenia systemu logistyki zwrotów zostały wymienione i dokładnie opisane w pracach [15, 122, 126, 143, 149, 168, 170, 171].

W oparciu o zdefiniowany zakres logistyki zwrotów oraz przeglądy literatury przedstawione w pracach [11, 15, 23, 29, 40] można wyróżnić następującą klasyfikację modeli logistyki zwrotów związanych z:

- projektowaniem wyrobów zorientowanych na odzysk;
- z procesem zbiórki;
- planowaniem procesów produkcji i odzysku oraz utrzymaniem zapasów, w tym modele prognozowania liczby zwrotów;
- inne, w tym modele związane z zarządzaniem łańcuchami dostaw.

Zagadnienie projektowania wyrobów zorientowanych na odzysk jest szeroko omawiane w literaturze, przykładem mogą być prace [36, 49, 51, 52, 61, 62, 74, 82, 83, 104, 129, 130, 131, 132, 133, 141, 142, 165, 166, 172]. Projektowanie wyrobów zorientowanych na odzysk obejmuje między innymi unikanie tworzenia obiektów o nieregularnych kształtach, które łatwiej ulegają uszkodzeniom w fazie dystrybucji oraz redukcję i standaryzację złączy w celu ułatwienia realizacji procesu demontażu.

W grupie modeli związanych z procesem zbiórki można wyróżnić modele wyboru lokalizacji miejsc zbiórki oraz modele związane z optymalizacją wykorzystania środków transportu w procesach zbiórki (np. [15, 143]).

Podstawowy model systemu zarządzania zapasami w logistyce zwrotów został przedstawiony w pracy [29]. Opiera się on na następujących założeniach:

- producentowi zgłaszane jest zapotrzebowanie na nowe produkty,
- nowe produkty są składowane w magazynie wyrobów finalnych,
- producent odbiera i składowuje zwroty produktów,
- zapotrzebowanie może zostać zrealizowane poprzez produkcję nowych wyrobów lub odzysk wartości ze zwrotów,
- produkty procesu odzysku są tak dobre, jak nowe wyroby,
- producent dąży do zminimalizowania kosztów funkcjonowania systemu, przy zachowaniu wymaganego poziomu obsługi.

Przedstawiony system łączy w sobie zarządzanie zapasami oraz planowanie produkcji i odzysku, jednakże nie uwzględnia np. harmonogramowania działań realizowanych w ramach tych procesów [29]. Wspomniane zagadnienie tworzy odrębną grupę modeli.

Połączenie zagadnień planowania produkcji oraz utrzymania zapasów sprawia, że jeden model może zostać zaliczony do dwóch osobnych grup. Przykładem może być przegląd modeli zarządzania zapasami [23] oraz przegląd modeli planowania produkcji [38].

Modele utrzymania zapasów w systemach logistyki zwrotów przedstawione w literaturze można podzielić na modele:

- deterministyczne,
- stochastyczne.

Deterministyczne modele zarządzania zapasami dzielą się na modele statyczne (np. model EOQ) oraz modele dynamiczne (np. model Wagnera-Whitina).

Stochastyczne modele utrzymania zapasów w systemach logistyki zwrotów można podzielić na dwie grupy:

- modele, w których zapotrzebowanie na nowy produkt jest zgłaszane w chwili pojawienia się zwrotu;
- modele, w których wielkość zapotrzebowania na nowe produkty nie zależy od liczby zwrotów, ale może zachodzić odwrotna zależność, że liczba zwrotów zależy od wcześniejszego zapotrzebowania.

Do pierwszej grupy można zaliczyć modele systemów obsługi. Są to systemy zamknięte, w których liczba elementów pozostaje niezmienna. Pojawienie się zwrotów nie podnosi poziomu łącznych zapasów przechowywanych w systemie (zapasy zwrotów oraz zapasy wyrobów finalnych). Zadaniem takiego systemu jest utrzymywanie zapasu części zamiennych w ilości zapewniającej wymagany poziom obsługi systemu technicznego [29].

W literaturze można odnaleźć szereg przeglądów literaturowych obejmujący tę grupę modeli. Na szczególną uwagę zasługują prace [17, 43, 65, 85, 108, 154, 160]. Do najbardziej znanych modeli utrzymania zapasów w systemach obsługi należy model METRIC, przedstawiony w pracy [128]. Modyfikacje modelu METRIC można znaleźć w wielu późniejszych pracach (np. [7, 95, 114, 127, 136, 161, 173]).

W drugiej grupie modeli stochastycznych można wyróżnić modele oparte na okresowym przeglądzie zapasów oraz modele oparte na przeglądzie ciągłym.

Szczegółowy przegląd drugiej grupy modeli stochastycznych oraz modeli deterministycznych został umieszczony w rozdziale 1.1. Przegląd ten został również opublikowany w pracach [109, 110, 111].

W większości prac obejmujących drugą grupę modeli stochastycznych prognozowanie liczby zwrotów do systemu odzysku jest oparte na założeniu, że wielkość zapotrzebowania oraz liczba zwrotów są niezależnymi zmiennymi losowymi opisanymi rozkładem Poissona [11, 40]. W literaturze można odnaleźć nieliczne prace, w których metody prognozowania są oparte na założeniu, że produkt sprzedany w danym okresie zostanie, z pewnym prawdopodobieństwem, zwrócony po upływie ustalonej liczby okresów. Metody te różnią się od siebie sposobem estymacji parametrów rozkładu prawdopodobieństwa opisującego możliwość zwrotu sprzedanego produktu [12, 15].

Prognozowanie liczby zwrotów jest również istotnym elementem planowania przebiegu procesu produkcji i odzysku. W pracach [97, 98, 99, 100] przedstawiono model planowania procesu produkcji, który w prognozowaniu liczby zwrotów opiera się na teorii niezawodności. W opisywanym modelu wielkość zapotrzebowania na nowe produkty nie zależy od liczby zwrotów. Autorzy opisują opracowaną metodę na przykładzie produktu składającego się z n komponentów tworzących strukturę szeregową. Analizowany produkt może zostać wycofany z eksploatacji, jeżeli którykolwiek z komponentów ulegnie uszkodzeniu lub użytkownik uzna produkt za nieprzydatny. Obiekt wycofany z eksploatacji jest demontowany. Komponenty, które nadają się do ponownego wykorzystania, są wysyłane do producenta wyrobu.

Prawdopodobieństwo, że obiekt wprowadzony do systemu eksploatacji w chwili t opuści go w przedziale czasu (t_a, t_b) jest wyznaczone z następującego wzoru:

$$P_{(t_a, t_b)} = \int_{t_a-t}^{t_b-t} h(x) dx, \quad (1.1)$$

gdzie:

$h(x)$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisującego wycofanie obiektu z eksploatacji.

Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji została opisana wzorem:

$$PN_{(t_a, t_b)} = \int_0^{t_a} g(t) \cdot P_{(t_a, t_b)}(t) dt, \quad (1.2)$$

gdzie:

$g(t)$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisującego zapotrzebowanie na nowe produkty.

Funkcja $g(t)$ spełnia następującą zależność:

$$D_T = \int_{(T-1)r}^{T \cdot r} g(t) dt, \quad (1.3)$$

gdzie:

D_T - zapotrzebowanie na produkt w okresie T ,

r - długość jednego okresu (np. tydzień).

Funkcja gęstości $g(t)$ jest uzyskiwana z następującego wzoru:

$$g(t) = \frac{dA(t)}{dt}, \quad (1.4)$$

gdzie:

$A(t)$ - funkcja, którą aproksymowano skumulowaną wartość zapotrzebowania na nowy produkt.

Autorzy określają również liczbę komponentów, które mogą zostać ponownie wykorzystane w przedziale czasu (t_a, t_b) . Autorzy zakładają, że komponent może zostać ponownie wykorzystany, jeżeli w chwili uszkodzenia jego trwałość reszkowa przekracza ustaloną wartość graniczną t_{resz} . Zagadnienie trwałości reszkowej w procesach odzysku komponentów zostało szczegółowo opisane w pracy [98].

W pracy [97] autorzy uwzględniają dodatkowo średni czas do uruchomienia produktu t_{ur} . Wtedy prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu w przedziale czasu (t_a, t_b) jest wyznaczone w następujący sposób:

$$P_{(t_a, t_b)}(t) = F(t_b - t - t_{ur}) - F(t_a - t - t_{ur}), \quad (1.5)$$

gdzie:

$F(t)$ - dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia obiektu technicznego [97, 98, 99, 100].

W literaturze można odnaleźć również inne modele opisujące planowanie i realizację procesów produkcji oraz odzysku, które nie analizują zagadnienia utrzymania zapasów (np. [8, 15, 35, 39, 41, 44, 63, 71, 75, 123, 139]). Przegląd literatury związanej z planowaniem produkcji w systemach wykorzystujących przetwarzanie, jako rodzaj odzysku, przedstawiono w pracy [38].

W literaturze poświęconej logistyce zwrotów można wyróżnić także inne obszary zainteresowań naukowców. W pracy [174] autorzy analizują wpływ jakości zwróconych produktów na koszty realizacji procesów logistyki zwrotów. W pracy [72] autorzy przekonują czytelnika o korzyściach płynących ze skracania cyklu życia produktów. Uważają, że produkty o krótkim cyklu życia, takie jak jednorazowe aparaty fotograficzne, mogą zostać z łatwością ponownie wykorzystane, ponieważ ich części składowe nie ulegają procesom starzenia.

Uwagę poświęcono również produktom zwracanym przez klientów bez podania konkretnej przyczyny. Są to z reguły produkty nieuszkodzone i pozbawione wad jakościowych. Autorzy zauważają, że obecnie z powodu braku koordynacji działań w łańcuchach dostaw, tylko niewielka część z tych produktów jest ponownie wykorzystywana (np. [26, 42]). Projektowaniu i koordynacji działań związanych z obsługą zwrotów w ramach łańcuchów dostaw poświęcone są również artykuły [25, 33] oraz osobny rozdział w [15]. Szczegółowy przegląd literatury poświęconej charakterystyce omawianych sieci logistycznych umieszczono w pracy [31].

1.1. Modele utrzymania zapasów w logistyce systemów odzysku

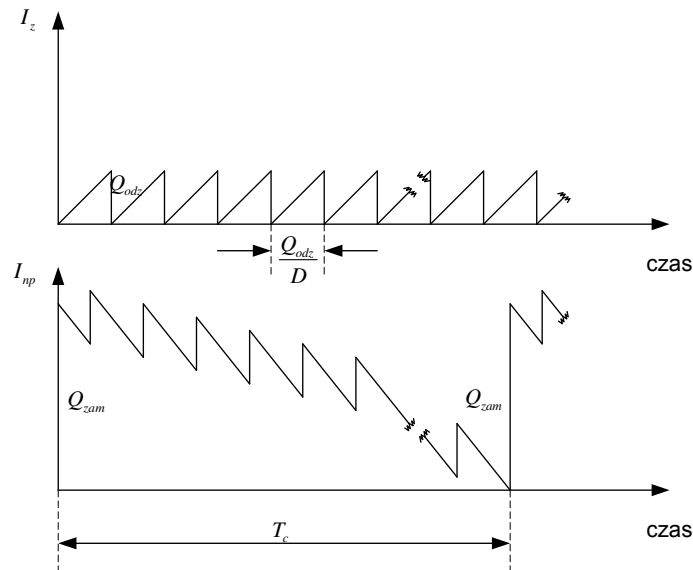
1.1.1. Modele deterministyczne

Pierwsze modele w tej kategorii zostały opracowane przez Schradya. W modelach Schradya zapotrzebowanie na wyroby finalne D może zostać zaspokojone przez odzysk zwrotów lub zakup nowych produktów. Wielkość zapotrzebowania D przypadająca na jednostkę czasu jest stała i znana dla całego horyzontu planowania. Produkty procesu odzysku są „tak dobre jak nowe”. Produkty są zwracane zgodnie ze stałym wskaźnikiem zwrotu $Z = \alpha D$, gdzie $0 \leq \alpha \leq 1$. Schrady nie rozważa możliwości unieszkodliwienia zwrotów, wszystkie poddawane są procesowi odzysku. W modelowanym systemie funkcjonują dwa magazyny:

- magazyn zwrotów, w którym składowane są produkty oczekujące na proces odzysku,
- magazyn wyrobów finalnych, w którym znajdują się produkty procesu odzysku oraz nowe wyroby.

Celem Schradya jest wyznaczenie optymalnej wielkości partii zakupowej Q_{zam} oraz partii odzysku Q_{odz} . W modelach uwzględniany jest czas realizacji dostawy partii zakupowej T_{zam} oraz partii odzysku T_{odz} . Schrady nie dopuszcza opóźnień w realizacji procesów. Prezentuje dwa modele zarządzania zapasami.

W pierwszym modelu (rys. 1.2) proces odzysku jest uruchamiany, gdy poziom zapasu w magazynie zwrotów osiągnie wartość Q_{odz} . Partia zakupowa jest dostarczana w chwili, gdy poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych spadnie do zera.



Rys. 1.2. Pierwszy model zaprezentowany przez Schradya w 1966 r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [125]

Drugi model Schradya (rys. 1.3) jest modyfikacją klasycznego modelu ekonomicznej wielkości zamówienia EOQ [29, 144]. W drugim modelu Schrady uwzględnia różne koszty składowania w pierwszym i drugim magazynie, które wynoszą odpowiednio k_{skz} i k_{sknp} . Różne są także koszty realizacji zlecenia zakupu K_{zam} oraz koszty uruchomienia procesu odzysku K_{odz} . W drugim modelu zapotrzebowanie jest całkowicie pokrywane przez odzysk zwrotów dopóki poziom zapasu znajdującego się w pierwszym magazynie jest większy bądź równy Q_{odz} . Jeżeli poziom zapasu w magazynie zwrotów spadnie do zera, to uruchamiana jest realizacja zlecenia zakupu. Od tej chwili zwroty są wyłącznie składowane przez okres:

$$T_M = \frac{(Q_{zam} + Q_{odz})}{D}. \quad (1.6)$$

Proces odzysku jest uruchamiany o T_{odz} jednostek czasu wcześniej niż nastąpi wyczerpanie zapasu w magazynie wyrobów finalnych. Przedział czasu pomiędzy kolejnymi dostawami partii zakupowych wyznacza analizowany czas cyklu T_c . W trakcie każdego cyklu proces odzysku jest uruchamiany m razy. Liczbę uruchomień procesu odzysku można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$m = \frac{\alpha Q_{zam}}{((1 - \alpha) Q_{odz})}. \quad (1.7)$$

Czas cyklu wyraża się wzorem:

$$T_c = \frac{(Q_{zam} + mQ_{odz})}{D} = \frac{Q_{zam}}{(1-\alpha)D} \quad (1.8)$$

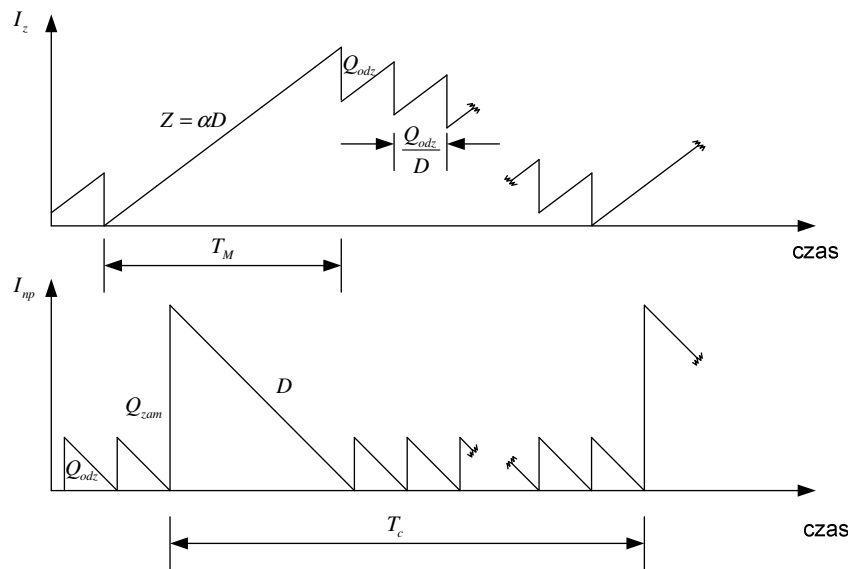
Funkcja łącznych kosztów przypadających na jednostkę czasu przyjmuje następującą postać:

$$\overline{TC} = \frac{K_{zam} D(1-\alpha)}{Q_{zam}} + \frac{K_{odz} \alpha D}{Q_{odz}} + \frac{k_{sknp}}{2} \left(Q_{odz} + \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) Q_{zam} \right) + \frac{k_{skz}}{2} (Q_{zam} + Q_{odz}) \rightarrow \min \quad (1.9)$$

Wyznaczone optymalne wielkości partii zakupowej i odzysku wynoszą odpowiednio [125]:

$$Q_{zam}^* = \sqrt{\frac{2K_{zam} D(1-\alpha)}{k_{sknp}(1-\alpha) + k_{skz}\alpha}} \quad (1.10)$$

$$Q_{odz}^* = \sqrt{\frac{2K_{odz} D}{k_{sknp} + k_{skz}}} \quad (1.11)$$



Rys. 1.3. Modyfikacja klasycznego modelu EOQ zaprezentowana przez Schradya w 1967r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [125]

Kontynuacją pracy Schradya zajęli się Steven Nahmias oraz Henry Rivera [102]. Autorzy rozpatrują podobny system składający się z dwóch magazynów. Nahmias i Rivera, w przeciwieństwie do Schradya, zakładają ograniczoną wydajność procesu odzysku. Produkty są odzyskiwane i dostarczane z zewnątrz w partiach. Wydajność procesu odzysku określa wskaźnik odzysku $W_{odz} > D$. Nahmias i Rivera zakładają zerowe czasy dostaw. Proces odzysku zostaje zawieszony gdy:

$$I_z < \left(\frac{Q_{odz}}{W_{odz}} \right) (W_{odz} - \alpha D). \quad (1.12)$$

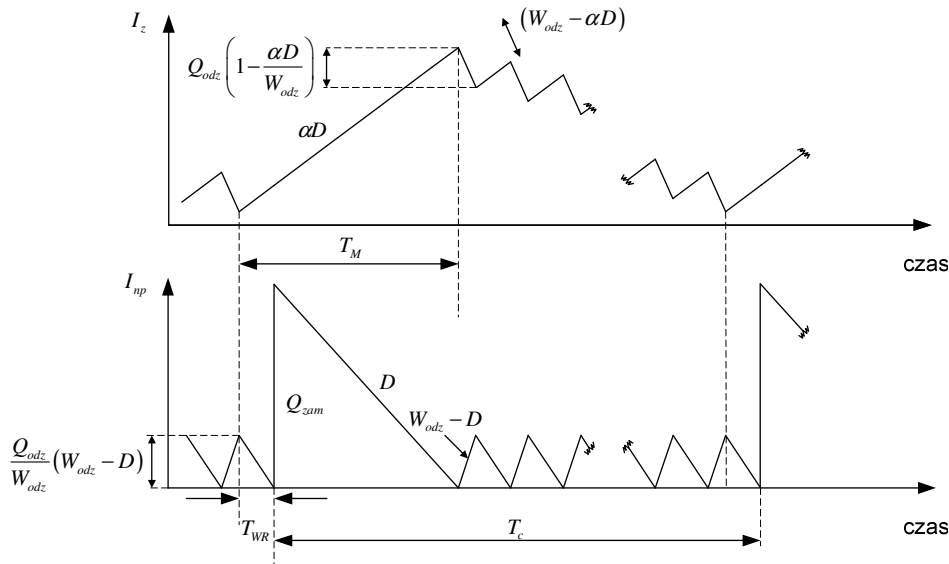
W przeciwieństwie do modelu Schradya brak jest założenia o zerowym poziomie zapasu w magazynie zwrotów, w chwili zawieszenia procesu odzysku. Wyczerpanie zapasu w magazynie wyrobów finalnych następuje po czasie:

$$T_{WR} = \frac{Q_{odz}}{W_{odz} \cdot D} (W_{odz} - D). \quad (1.13)$$

Jest to jednocześnie chwila dostarczenia partii zakupowej. Okres składowania zwrotów można wyrazić wzorem:

$$T_M = T_{WR} + \frac{Q_{zam}}{D} = \frac{Q_{zam}}{D} + \left(\frac{Q_{odz}}{D} \right) \left(1 - \frac{D}{W_{odz}} \right). \quad (1.14)$$

Model opracowany przez Nahmiasa oraz Rivera został przedstawiony na rys.1.4.



Rys. 1.4. Modyfikacja modelu Schradya z ograniczoną wydajnością procesu odzysku

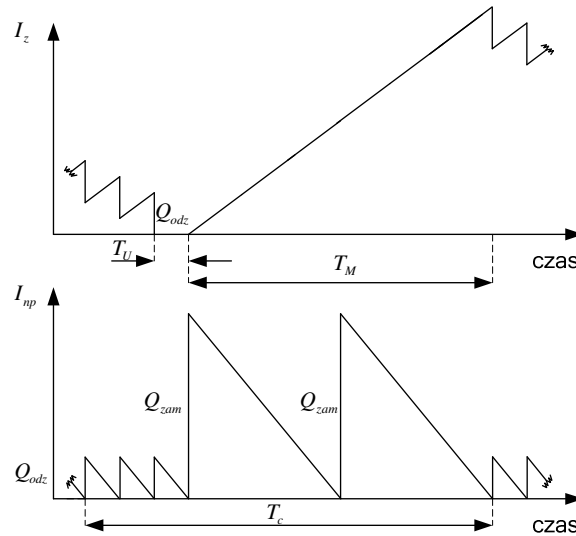
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [102]

Optymalne wielkości partii zakupowej oraz partii odzysku wynoszą odpowiednio:

$$Q_{zam}^* = \sqrt{\frac{2K_{zam}D(1-\alpha)}{k_{sknp}(1-\alpha) + k_{skz}\alpha}}, \quad (1.15)$$

$$Q_{odz}^* = \sqrt{\frac{2K_{odz}D}{(k_{sknp} + k_{skz}) \left(1 - \frac{D}{W_{odz}} \right)}}. \quad (1.16)$$

Kolejnym rozwinięciem modelu przedstawionego przez Schradya jest model opracowany przez Teuntera (rys. 1.5). W podejściu zaprezentowanym przez tego autora, n partii produkcyjnych występuje na przemian z m partiami odzysku. W modelu Schradya występuje tylko jedna partia zakupowa.



Rys. 1.5. Model Teuntera z trzema partiami odzysku występującymi na przemian z dwoma partiami produkcji

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [144, 145, 146, 147]

Czasy produkcji oraz odzysku są pomijane. Nie ma opóźnień w dostawach do magazynu wyrobów finalnych. Zapas wyrobów finalnych jest odnawiany natychmiast, gdy jego poziom spadnie do zera. Teunter dopuszcza pozbycie się niektórych zwrotów. W modelu uwzględniane są koszty produkcji k_p , odzysku k_r oraz unieszkodliwienia zwrotów k_u , koszty uruchomienia procesu produkcji K_{prod} oraz odzysku K_{odz} , koszty składowania zwrotów k_{skz} , koszty składowania wyrobów finalnych pochodzących z odzysku k_{skpr} oraz nowych wyrobów k_{sknp} . Zwroty są unieszkodliwiane tylko podczas okresu T_U . Liczba zwrotów unieszkodliwianych w jednostce czasu wyraża się wzorem:

$$\overline{Q_u} = \psi D, \text{ dla } 0 \leq \psi \leq \alpha. \quad (1.17)$$

Długość okresu unieszkodliwiania można przedstawić wzorem:

$$T_U = \frac{\alpha - \psi}{\alpha} \cdot T_c, \quad (1.18)$$

gdzie:

T_c - długość jednego cyklu podczas, którego wytwarzanych jest n partii produkcyjnych oraz odzyskiwanych jest m partii odzysku.

Czas cyklu można przedstawić w następujący sposób:

$$T_c = \frac{1}{D} (nQ_{prod} + mQ_{odz}). \quad (1.19)$$

Celem postępowania jest wyznaczenie takich wartości $Q_{prod}, Q_{odz}, n, m, \psi$, dla których wartość średnia całkowitych kosztów funkcjonowania systemu jest najniższa. Teunter uważa, że zawsze przynajmniej jedna ze zmiennych decyzyjnych n, m powinna być ustalona i równa jedności. Teunter zauważa, że polityka, w której $n = 1$, była analizowana przez Schradya, ale bez uwzględnienia możliwości unieszkodliwiania zwrotów. Wartość średnia całkowitych kosztów funkcjonowania systemu dla $n = 1$ przyjmuje następującą postać:

$$\begin{aligned} \overline{TC} = & \frac{K_{prod} D(1-\psi)}{Q_{prod}} + \frac{K_{odz} D\psi}{Q_{odz}} + k_{skpr} \frac{1}{2} \psi Q_{odz} + k_{sknp} \frac{1}{2} (1-\psi) Q_{prod} + \\ & + k_{skz} \frac{1}{2} \left(\alpha(Q_{prod} + Q_{odz}) - (\alpha - \psi) \left(Q_{prod} + \frac{\psi}{1-\psi} Q_{prod} \right) \right) \frac{\psi}{\alpha} + \\ & + D((1-\psi)k_p + \psi k_r + (\alpha - \psi)k_u) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1.20)$$

Optymalna wielkość partii produkcyjnej, partii odzysku oraz optymalna liczba uruchomień procesu odzysku wynoszą odpowiednio:

$$Q_{prod}^* = \sqrt{\frac{2K_{prod} D(1-\psi)}{k_{sknp}(1-\psi) + k_{skz} \left(\psi - \frac{\alpha - \psi}{1-\psi} \frac{\alpha}{\psi} \right)}}, \quad (1.21)$$

$$Q_{odz}^* = \sqrt{\frac{2K_{odz} D}{k_{skpr} + k_{skz}}}, \quad (1.22)$$

$$m^* = \frac{\psi}{1-\psi} \cdot \frac{Q_{prod}^*}{Q_{odz}^*}. \quad (1.23)$$

W kolejnym kroku Teunter wyznacza optymalne wartości Q_{prod}, Q_{odz} oraz n przy założeniu, że $m = 1$. Funkcja średnich łącznych kosztów dla $m = 1$ przyjmuje następującą postać:

$$\begin{aligned} \overline{TC} = & \frac{K_{prod} D(1-\psi)}{Q_{prod}} + \frac{K_{odz} D\psi}{Q_{odz}} + k_{skpr} \frac{1}{2} \psi Q_{odz} + k_{sknp} \frac{1}{2} (1-\psi) Q_{prod} + \\ & + k_{skz} \frac{1}{2} Q_{odz} \frac{\psi}{\alpha} + D((1-\psi)k_p + \psi k_r + (\alpha - \psi)k_u) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1.24)$$

Teunter wyznacza optymalne wartości Q_{prod} , Q_{odz} oraz n dla dwóch przypadków:

1. Gdy $\psi = 0$, tzn. że wszystkie zwrócone produkty są unieszkodliwiane:

$$Q_{prod}^* = \sqrt{\frac{2K_{prod}D}{k_{sknp}}}, \quad (1.25)$$

$$Q_{odz}^* = \sqrt{\frac{2K_{odz}D\alpha}{\alpha k_{skpr} + k_{skz}}}, \quad (1.26)$$

$$n^* = \infty. \quad (1.27)$$

2. Gdy $\psi = \alpha$, tzn. że wszystkie zwrócone produkty są poddawane procesom odzysku:

$$Q_{prod}^* = \sqrt{\frac{2K_{prod}D}{k_{sknp}}}, \quad (1.28)$$

$$Q_{odz}^* = \sqrt{\frac{2K_{odz}D\alpha}{\alpha k_{skpr} + k_{skz}}}, \quad (1.29)$$

$$n^* = \frac{1-\psi}{\psi} \frac{Q_{odz}^*}{Q_{prod}^*}. \quad (1.30)$$

W jednej z prac Teunter analizuje również przypadek, w którym wielkość zgłaszanego zapotrzebowania oraz liczba zwrotów są zmiennymi losowymi opisanymi rozkładem Poissona. Do wyznaczenia wielkości partii produkcyjnej oraz partii odzysku wykorzystuje równania wyznaczone dla modelu deterministycznego [144, 145, 146, 147].

Fleischman w pracy [29] zauważa, że wszystkie z powyższych modeli szukają optymalnych wartości parametrów narzuconej polityki postępowania. Nie sprawdzają optymalności samej polityki.

Model zaprezentowany w [147] został rozwinięty w pracach [78, 79]. W pracy [78] autorzy zauważają, że w pracy Teuntera parametry n oraz m mogą przyjmować wartości ze zbioru liczb rzeczywistych. Autorzy opracowują model symulacyjny, w którym wyznaczone wartości parametrów n oraz m zaokrąglają do najbliższej liczby całkowitej większej bądź równej jedności. W pracy [79] model Teuntera został rozwinięty poprzez uwzględnienie możliwości występowania zleceń oczekujących.

Kolejnymi autorami, którzy opisują możliwość zastosowania modelu EOQ w logistyce zwrotów są Marilyn C. Mabini, Liliane M. Pintelon oraz Ludo F. Gelders. Autorzy rozwijają model Schradya rozpatrując dwie sytuacje:

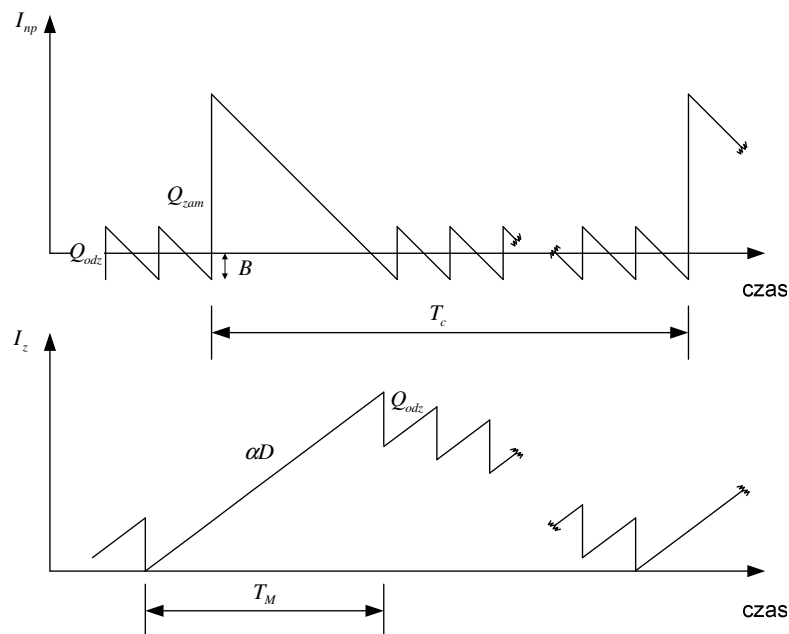
- procesom odzysku jest poddawany tylko jeden rodzaj produktów (model jednoelementowy);
- jednocześnie realizowany jest proces odzysku i różnych typów produktów (model wieloelementowy).

W modelu jednoelementowym Mabini uwzględnia wartość nowych produktów L_{np} , produktów oczekujących na odzysk L_z oraz koszt składowania h wyrażony, jako procent wartości produktu. Znając h , L_z oraz L_{np} można wyznaczyć jednostkowy koszt składowania zwrotów k_{skz} oraz jednostkowy koszt składowania wyrobów finalnych k_{sknp} . W przeciwieństwie do modelu Schradya zlecenia mogą przyjmować status oczekujących, tzn. że zamówienia niezrealizowane na skutek wystąpienia braku w wielkości B oczekują na realizację. Dozwolone jest wystąpienie określonej liczby braków w zapasie.

W analizowanym modelu obliczane są dodatkowo chwila zamawiania s_p oraz chwila uruchomienia odzysku s_r . Obliczany jest średni poziom zapasu nowych produktów, który jest opisany za pomocą następującego wyrażenia:

$$\bar{I}_{np} = \frac{(1-\alpha)(Q_{zam} - B)^2}{2Q_{zam}} + \frac{\alpha(Q_{odz} - B)^2}{2Q_{odz}}. \quad (1.31)$$

Opisywany model został przedstawiony na rys. 1.6.



Rys. 1.6. Model Mabini uwzględniający możliwość wystąpienia braku w zapasie wyrobów finalnych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [86]

W modelu Mabini zachowane jest założenie Schradya, o zerowym poziomie zapasu produktów oczekujących na odzysk ,w chwili zawieszenia procesu odzysku. Średni zapas tych produktów można wyznaczyć z równania:

$$\bar{I}_z = \frac{1}{2} \alpha (Q_{zam} + Q_{odz}). \quad (1.32)$$

Według autorów do obliczenia całkowitych poniesionych kosztów należy uwzględnić:

- koszty składowania nowych oraz oczekujących na odzysk produktów,
- koszty uruchomienia procesów zakupu oraz odzysku wyrobów.

Minimalizowana funkcja łącznych kosztów ma następującą postać:

$$\begin{aligned} \overline{TC} = & \frac{1}{2} k_{sknp} \left((1-\alpha) \frac{(Q_{zam} - B)^2}{Q_{zam}} + \alpha \frac{(Q_{odz} - B)^2}{Q_{odz}} \right) + \frac{1}{2} k_{skz} \alpha (Q_{zam} + Q_{odz}) \\ & + K_{zam} \frac{(1-\alpha)D}{Q_{zam}} + K_{odz} \frac{\alpha D}{Q_{odz}} \end{aligned} \quad (1.33)$$

W modelu wieloelementowym większość oznaczeń pozostaje niezmienna. Różnica polega na dodaniu indeksu określającego rodzaj produktu. Procesom odzysku podawanych jest i różnych typów produktów. Autorzy zakładają, że wydajność procesu odzysku jest ograniczona. Konieczne jest rozdzielenie dostępnego potencjału na poszczególne wyroby. W przeciwieństwie do modelu jednoelementowego, autorzy nie dopuszczają opóźnień w dostawach do magazynu, wszystkie produkty nadają się do odzysku, a zakup produktów jest ograniczony do przypadków, gdy wyczerpie się potencjał odzysku. Produkty, które nie zostały poddane procesom odzysku mają mniejszą wartość. W modelu wieloelementowym autorzy uwzględniają dodatkowo jednostkowe koszty odzysku oraz koszty zakupu, pomniejszone o przychody ze sprzedaży produktów nie poddanych procesowi odzysku [86].

Kolejnym autorem analizującym model EOQ w logistyce zwrotów jest Knut Richter. Richter opracował dwupoziomowy model opisujący wytwarzanie nowych wyrobów oraz odzysk zużytych produktów. Autor analizuje dwa warsztaty. W pierwszym realizowane są procesy produkcji oraz odzysku, a w drugim produkty są użytkowane. Produkty ulegają uszkodzeniom. Uszkodzone produkty, które można ponownie wykorzystać są składowane w drugim warsztacie, a pozostałe są unieszkodliwiane. Po pewnym okresie T_c , w którym realizowana jest zbiórka zużytych produktów, magazynowane wyroby są przenoszone do pierwszego warsztatu, w którym następuje odzysk wartości. Warsztat, w którym produkty są użytkowane zgłasza stałą wielkość zapotrzebowania D . Produkty są składowane zgodnie z współczynnikiem zwrotu α . Zapotrzebowanie może zostać zaspokojone przez odzysk

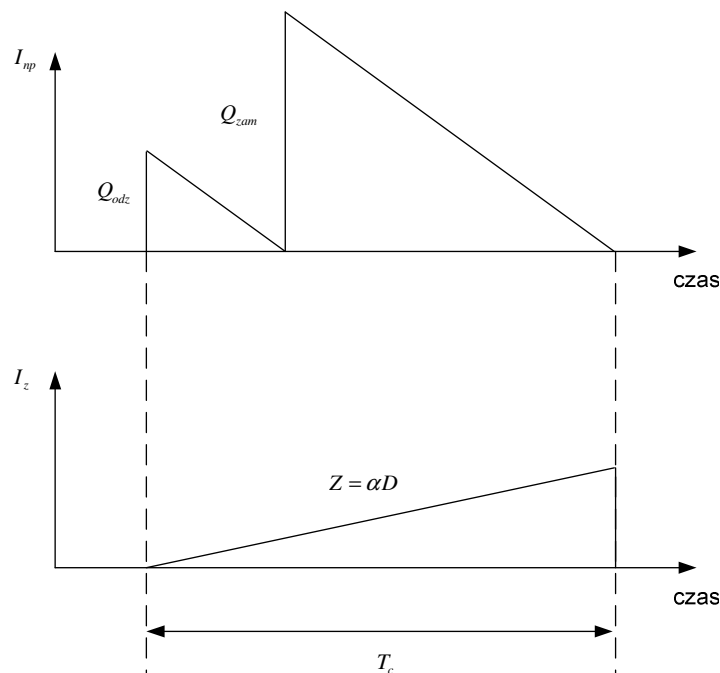
uszkodzonych produktów oraz produkcję nowych wyrobów. Model opracowany przez Richtera został przedstawiony na rys. 1.7.

W przeciwieństwie do Schradya pierwszy w cyklu jest proces odzysku. Produkty procesu odzysku są „tak dobre jak nowe”. Jeżeli po procesach odzysku pozostanie niezrealizowane zapotrzebowanie, to uruchamiany jest proces wytwarzania nowych wyrobów. Czasy produkcji oraz odzysku są pomijane.

Richter wyznacza ekonomiczną wielkość zamówienia w okresie zbiórki dla produkcji oraz odzysku, która wyraża się wzorem:

$$Q = DT_c. \quad (1.34)$$

Wielkość partii odzysku wynosi αQ a unieszkodliwiania $(1-\alpha)Q$. Autor zakłada, że w trakcie okresu T_c jest uruchamiane jedno zlecenie produkcji oraz jedno zlecenie odzysku.



Rys. 1.7. Model Richtera dla $n=1$ oraz $m=1$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [115, 116, 117, 119, 120]

W modelu Richtera uwzględniane są następujące koszty:

- jednostkowe koszty odzysku k_r , produkcji k_p oraz unieszkodliwiania $k_u \in (-\infty, +\infty)$;
- łączny koszt uruchomienia procesów dla całego okresu TC_{ur} ;
- jednostkowe koszty składowania wyrobów w pierwszym k_{sknp} oraz drugim magazynie k_{skz} .

Funkcja łącznych kosztów przypadających na jednostkę czasu jest następująca:

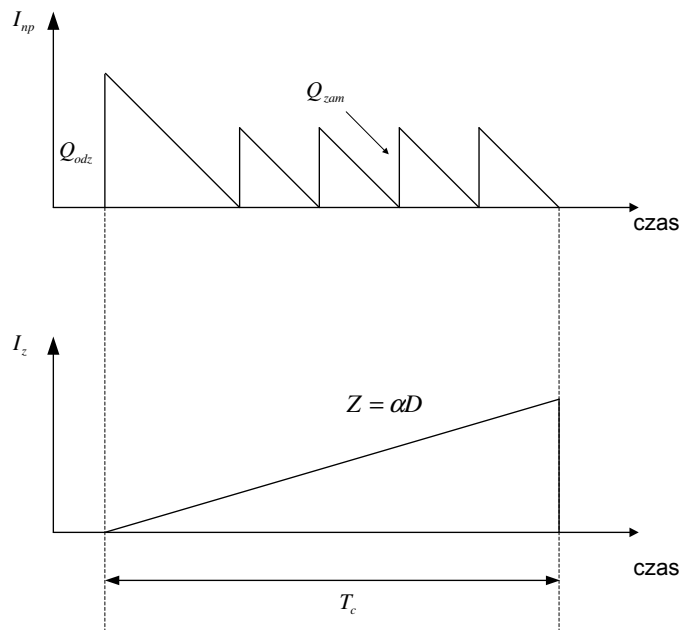
$$\overline{TC} = \frac{DTC_{ur}}{Q} + \frac{Q}{2} \left[\left((1-\alpha)^2 + \alpha^2 \right) k_{sknp} + \alpha k_{skz} \right] + D \left[(1-\alpha) \cdot (k_p + k_u) + \alpha k_r \right] \rightarrow \min . \quad (1.35)$$

Zgodnie z tą funkcją optymalna wielkość partii wynosi:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DTC_{ur}}{k_{sknp} \left((1-\alpha)^2 + \alpha^2 \right) + \alpha k_{skz}}} . \quad (1.36)$$

Po podstawieniu Q^* do funkcji łącznych kosztów, autor wyznacza optymalną liczbę unieszkodliwianych obiektów, dla której łączne koszty są najniższe.

Opisany model autorstwa K. Richtera dopuszcza jedno uruchomienie procesu produkcji oraz odzysku w czasie jednego cyklu. W kolejnych pracach Richter znosi to ograniczenie pozwalając na realizację n procesów produkcji oraz m uruchomień odzysku (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Model Richtera dla $m=1$ oraz $n=4$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [115, 116, 117, 119, 120]

Łączny koszt uruchamiania procesów dla całego okresu TC_{ur} został zastąpiony przez koszt uruchomienia procesu odzysku K_{odz} oraz koszt uruchomienia produkcji K_{prod} .

Richter rozpatruje dwa przypadki. W pierwszym odrzuca jednostkowe koszty produkcji, odzysku oraz unieszkodliwiania i minimalizuje następującą funkcję kosztów przypadających na jednostkę czasu w analizowanym okresie T_c :

$$\overline{TC} = \frac{D(mK_{odz} + nK_{prod})}{Q} + \frac{Q}{2} \left[\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + \alpha k_{skz} + \frac{\alpha^2 k_{skz} (m-1)}{m} \right] \rightarrow \min . \quad (1.37)$$

Optymalna wielkość partii Q^* wyraża się następującym wzorem:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2D(mK_{odz} + nK_{prod})}{\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + k_{skz} \alpha + k_{skz} \alpha^2 \frac{(m-1)}{m}}} . \quad (1.38)$$

W kolejnym kroku autor wyznacza optymalne wartości n oraz m .

W drugim przypadku autor minimalizuje następującą funkcję łącznych kosztów [115, 116, 117, 119, 120]:

$$\overline{TC} = \frac{D(mK_{odz} + nK_{prod})}{Q} + \frac{Q}{2} \left[\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + \alpha k_{skz} + \frac{\alpha^2 k_{skz} (m-1)}{m} \right] + D((1-\alpha) \cdot (k_p + k_u) + \alpha k_r) \rightarrow \min \quad (1.39)$$

Autorami, którzy analizują zagadnienie ekonomicznej wielkości zamówienia w logistyce zwrotów są również Shie-Gheun Koh, Hark Hwang, Kwon-Ik Sohn oraz Chang-Seong Ko. W swojej pracy prezentują model bardzo zbliżony do modeli opisywanych przez takich autorów, jak: Schrady (1967), Mabini (1992) oraz Richter (1996). Różnica polega jedynie na uwzględnieniu czasu trwania procesu odzysku. Autorzy zakładają, że przynajmniej jedna ze zmiennych określających liczbę zleceń zakupu oraz liczbę uruchomień procesu odzysku jest równa jedności. Autorzy dążą do wyznaczenia ekonomicznej wielkości zamówienia dla nowych produktów oraz optymalnej wielkości zapasu zwrotów, przy której uruchamiany jest proces odzysku. Nie pojawiają się opóźnienia. Odzysk jest bardziej opłacalny niż zakup nowych produktów. Wartości wskaźników, określających wydajność procesu odzysku oraz wielkość zgłaszanego zapotrzebowania są większe, niż wartość wskaźnika określającego liczbę zwrotów w jednostce czasu. [77]

Autorami, którzy również uwzględniają czas trwania procesów odzysku i produkcji są Knut Richter oraz Imre Dobos. Autorzy opracowali rozwinięcie prezentowanego wcześniej modelu Richtera. Liczba zwrotów w jednostce czasu wyraża się wzorem:

$$Z = \alpha D, \text{ dla } 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (1.40)$$

Liczba zwrotów poddawanych procesom odzysku w jednostce czasu wynosi:

$$Z_{odz} = \delta Z, \text{ dla } 0 \leq \delta \leq 1. \quad (1.41)$$

Liczba zwrotów poddawanych unieszkodliwianiu wyraża się wzorem:

$$Z_u = (1 - \delta)Z. \quad (1.42)$$

Autorzy uwzględniają wydajność procesów odzysku oraz produkcji. Wydajność procesu odzysku wynosi:

$$W_{odz} = \frac{D}{\gamma}, \text{ dla } 0 < \gamma \leq 1. \quad (1.43)$$

Wydajność procesu produkcji wynosi:

$$W_{prod} = \frac{D}{\beta}, \text{ dla } 0 < \beta \leq 1. \quad (1.44)$$

Zapotrzebowanie na nowe wyroby jest zaspokajane przez odzysk zwrotów przez okres T_R zwany cyklem odzysku. Czas cyklu produkcji wnosi T_P jednostek czasu. Całkowity czas cyklu T_c jest przez autorów nazywany cyklem produkcji i odzysku i wyraża się następującym wzorem:

$$T_c = mT_R + nT_P. \quad (1.45)$$

W okresie T_c do unieszkodliwienia kierowanych jest $Z_u T_c$ zwrotów. Okres w którym obiekty są poddawane unieszkodliwianiu można wyznaczyć z następującej zależności:

$$T_U = (1 - \delta)T_c. \quad (1.46)$$

W trakcie tego przedziału czasu wszystkie zwracane produkty są natychmiast unieszkodliwiane.

W modelu Richtera i Dobosa poziom zapasów w magazynie zwrotów I_z wzrasta do chwili ukończenia cyklu produkcyjnego. Osiąga wartość maksymalną:

$$S_z = [(1 + \alpha)m + \alpha(1 + \gamma)]DT_R. \quad (1.47)$$

Jest to jednocześnie wartość początkowa, która określa liczbę zwrotów znajdujących się w magazynie na początku cyklu produkcji i odzysku. Maksymalne wartości zapasu produktów odzysku oraz wyrobów nowych wynoszą odpowiednio:

$$S_r = (1 - \gamma)DT_R, \quad (1.48)$$

$$S_p = (1 - \beta)DT_P. \quad (1.49)$$

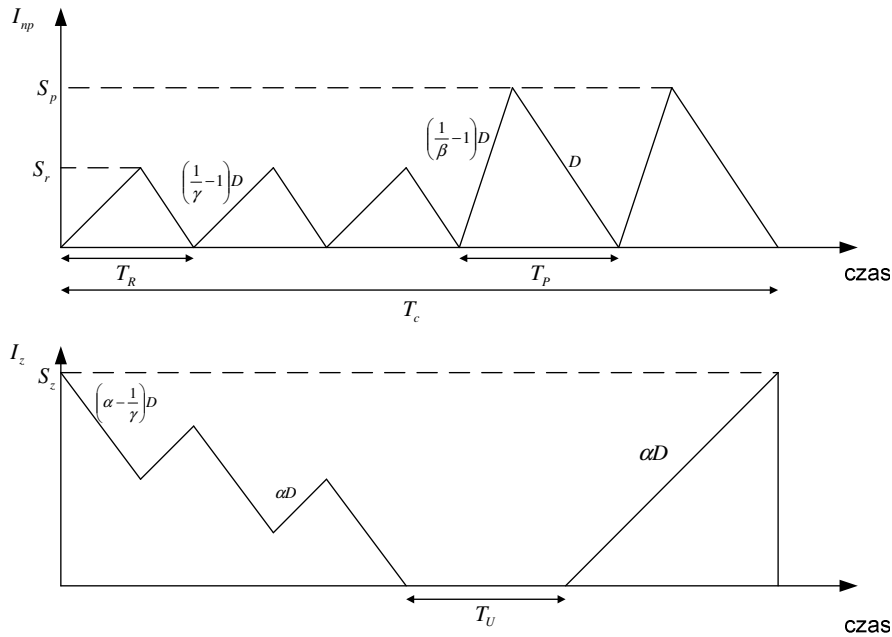
Produkty są wytwarzane i odzyskiwane w partiach. Wielkość partii odzysku wyraża się wzorem:

$$Q_{odz} = DT_R. \quad (1.50)$$

Natomiast wielkość partii produkcji można wyznaczyć z zależności:

$$Q_{prod} = DT_P. \quad (1.51)$$

Model opracowany przez Dobosa oraz Richtera został przedstawiony na rysunku 1.9.



Rys. 1.9. Model Dobosa oraz Richtera dopuszczający wiele uruchomień procesu produkcji i odzysku oraz unieszkodliwienie pewnej liczby zwrotów

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [18, 19, 20, 21, 22, 116]

W pracy autorzy wyznaczają optymalną długość cyklu produkcji i odzysku, wielkość partii produkcyjnej, wielkość partii odzysku oraz liczbę uruchomień procesu produkcji i odzysku. Optymalna długość cyklu produkcji i odzysku wynosi:

$$T_c^* = \sqrt{\frac{2TC_{ur}}{DTC_{sk}}}, \quad (1.52)$$

gdzie:

TC_{ur} - łączne koszty uruchomienia procesów przypadające na jednostkę czasu,

TC_{sk} - łączne koszty składowania przypadające na jednostkę czasu.

Optymalne długości cykli produkcji i odzysku wynoszą odpowiednio:

$$T_p^* = \frac{1 - \alpha\delta}{n} \sqrt{\frac{2TC_{ur}}{DTC_{sk}}}, \quad (1.53)$$

$$T_R^* = \frac{\alpha\delta}{m} \sqrt{\frac{2TC_{ur}}{DTC_{sk}}}. \quad (1.54)$$

Optymalne wielkości partii produkcyjnej oraz partii odzysku wynoszą odpowiednio:

$$Q_{prod}^* = \frac{1-\alpha\delta}{n} \sqrt{\frac{2DTC_{ur}}{TC_{sk}}}, \quad (1.55)$$

$$Q_{odz}^* = \frac{\alpha\delta}{m} \sqrt{\frac{2DTC_{ur}}{TC_{sk}}}. \quad (1.56)$$

W kolejnej pracy Dobos oraz Richter analizują zagadnienie związane z jakością zwracanych produktów. Autorzy zakładają, że liczba zwrotów, które mogą zostać ponownie wykorzystane, jest ograniczona [18, 19, 20, 21, 22, 116].

Model zaprezentowany przez Richtera (1996a, 1996b) został rozwinięty przez Ahmed'a M.A. El Saadany oraz Mohammad'a Y. Jaber. Richter zakłada, że pierwszy analizowany okres rozpoczyna się procesem odzysku. Ahmed i Jaber zauważają, iż w pierwszym okresie powinna być realizowana tylko produkcja nowych wyrobów, ponieważ wcześniej nic nie zostało wyprodukowane i dlatego nie ma zwrotów. Ponadto założenie Richtera prowadzi do powstania niewykorzystanego zapasu w drugim magazynie, co podnosi koszty składowania. Autorzy uważają również, że w modelu Richtera konieczne jest uwzględnienie kosztów związanych z przebrojeniem linii produkcyjnej z odzysku na produkcję K_{pprod} i z produkcji na odzysk K_{podz} . Autorzy zakładają również brak ograniczenia zdolności produkcyjnych i odzysku. Długość pierwszego cyklu, w którym realizowana jest tylko produkcja, jest mniejsza niż długość cyklu, w którym przeprowadzane są oba procesy. Po uwzględnieniu tego założenia funkcja łącznych kosztów przypadających na jednostkę czasu przyjmuje następującą postać:

$$\overline{TC} = \frac{D(mK_{odz} + nK_{prod})}{Q} + \frac{Q}{2} \left[\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + \alpha k_{skz} - \frac{\alpha^2 k_{skz} (m-1)}{m} \right] \rightarrow \min. \quad (1.57)$$

Optymalna wielkość partii wynosi:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2D(mK_{odz} + nK_{prod})}{\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + k_{skz} \alpha \left(1 - \alpha + \frac{\alpha}{m} \right)}}. \quad (1.58)$$

Uwzględnienie kosztów przebrojenia maszyn i urządzeń prowadzi do zmiany sposobu wyznaczania łącznych kosztów uruchomienia procesów w okresie T_c . W tym przypadku funkcja ta dla m uruchomień odzysku i n uruchomień produkcji, przyjmuje następującą postać:

$$TC_{ur} = (m-1)K_{odz} + K_{podz} + (n-1)K_{prod} + K_{pprod}. \quad (1.59)$$

Po uwzględnieniu kosztów przebrojenia maszyn i urządzeń funkcja łącznych kosztów przyjmuje poniższą formę:

$$\begin{aligned} \overline{TC} = & \frac{D[(m-1)K_{odz} + K_{podz} + (n-1)K_{prod} + K_{pprod}]}{Q} + \\ & + \frac{Q}{2} \left[\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + \alpha k_{skz} - \frac{\alpha^2 k_{skz} (m-1)}{m} \right] \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1.60)$$

Wyznaczona optymalna wielkość partii wynosi [24, 60]:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2D((m-1)K_{odz} + K_{podz} + (n-1)K_{prod} + K_{pprod})}{\left(\frac{(1-\alpha)^2}{n} + \frac{\alpha^2}{m} \right) k_{sknp} + k_{skz} \alpha \left(1 - \alpha + \frac{\alpha}{m} \right)}}. \quad (1.61)$$

W kolejnej pracy [59] ci sami autorzy zakładają, że produkty procesu odzysku różnią się od nowych wyrobów. Rozpatrują różne wartości zapotrzebowania zgłaszanego na nowe wyroby i produkty procesu odzysku.

Kolejnymi autorami opisującymi możliwość zastosowania modeli EOQ w logistyce zwrotów są Yong Hui Oh oraz Hark Hwang. Autorzy w swojej pracy analizują system, w którym zwrócone produkty po odzysku są traktowane jako surowiec, w procesie produkcji nowych wyrobów. Autorzy zakładają, że każdy zwrócony produkt nadaje się do odzysku. Celem systemu jest kontrola zamówień nowego surowca oraz uruchomień procesu produkcji. Podobnie, jak w poprzednich modelach wartość wskaźnika określającego wielkość zapotrzebowania na nowe produkty jest mniejsza, niż wartość wskaźnika określającego wydajność procesu produkcji. Produkty są zwracane zgodnie z stałym wskaźnikiem zwrotu. W modelu pomijane są czasy trwania procesu odzysku oraz dostawy nowego surowca. Ponadto w modelu uwzględniane są następujące parametry:

K_{zams} - koszt realizacji zamówienia nowego surowca,

k_{skz} - koszt składowania surowca (produkt procesu odzysku oraz nowy surowiec),

k_{sknp} - koszt składowania gotowych wyrobów,

o - liczba zamówień nowego surowca w trakcie jednego cyklu,

Q_{zams} - wielkość partii zakupowej nowego surowca.

Podczas analizy modelu autorzy rozpatrują dwa przypadki:

- jedno zamówienie surowca z zewnątrz i wiele uruchomień procesu produkcji;

– wiele zamówień z zewnątrz i tylko jedno uruchomienie procesu produkcji.

W pierwszym przypadku dla danej wartości n wyznaczana jest optymalna wielkość partii produkcyjnej:

$$Q_{prod}^* = \sqrt{\frac{D \left(\frac{K_{zams}}{n} + K_{prod} \right)}{k_{sks} \frac{1-\alpha}{2} n + A}}, \text{ gdzie} \quad (1.62)$$

$$A = (k_{sknp} - k_{sks}) \cdot \frac{W_{prod} - D}{2W_{prod}} + k_{sks} \frac{W_{prod} - D}{W_{prod}} \left(\alpha - (1-\alpha) \cdot \frac{\alpha D}{W_{prod} - \alpha D} \right). \quad (1.63)$$

W kolejnym kroku wyznaczana jest optymalna liczba uruchomień produkcji n^* , która przy założeniu, że n jest liczbą całkowitą wynosi:

$$n^* = \sqrt{\frac{K_{zams} A}{K_{prod} k_{sks} \frac{1-\alpha}{2}}}. \quad (1.64)$$

W drugim przypadku, kiedy występuje wiele zamówień na nowe surowce, optymalna wielkość partii produkcyjnej wynosi:

$$Q_{prod}^* = \sqrt{\frac{D(oK_{zams} + K_{prod})}{\frac{1}{2W_{prod}} (Dk_{sks} A + k_{sknp} (W_{prod} - D))}}. \quad (1.65)$$

Optymalna liczba zamówień surowca o^* , przy założeniu, że o jest liczbą całkowitą, wynosi [50]:

$$o^* = \sqrt{\frac{K_{prod} D k_{sks} \left(1 - \frac{\alpha (W_{prod} - D)}{W_{prod} - \alpha D} \right) (1-\alpha)}{K_{zams} D k_{sks} \frac{\alpha (W_{prod} - D)^2}{W_{prod}} \left(\frac{1}{D} + \frac{\alpha}{W_{prod} - \alpha D} \right) + k_{sknp} (W_{prod} - D)}}. \quad (1.66)$$

Na szczególną uwagę zasługuje praca [105], w której autorzy uwzględniają nieliniowy charakter funkcji opisujących wielkość zapotrzebowania na nowe wyroby oraz liczbę obiektów wycofywanych z eksploatacji. Autorzy zakładają, że liczba zwrotów jest proporcjonalna do wielkości zapotrzebowania na nowe wyroby. W pracy [105] uwzględniono trzy rodzaje magazynów: magazyn zwrotów, magazyn wyrobów finalnych oraz magazyn czystego surowca wykorzystywanego do produkcji nowych wyrobów.

Na zainteresowanie zasługują prace [54, 55], w których autorzy analizują wpływ czasu składowania obiektów wycofanych z eksploatacji na realizację procesu odzysku. Wydłużenie czasu składowania może wpływać na zwiększenie kosztów oraz wydłużenie czasu trwania procesu odzysku.

W analizowanej literaturze osobną kategorię stanowią modele oparte na programowaniu dynamicznym. W większości prac prezentowane są rozwinięcia algorytmu Wagnera-Whitina. Wykorzystanie programowania dynamicznego w procesie zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji zostało omówione w pracach [54, 68, 80, 91, 118, 121, 158].

Na uwagę zasługuje również praca [93], w której został opracowany dwupoziomowy model zapasów. Pierwszy poziom obejmuje dystrybutora produktów, drugi producenta. Na pierwszym poziomie znajduje się wyłącznie magazyn wyrobów finalnych. Na drugim poziomie umieszczono magazyn zwrotów oraz drugi magazyn wyrobów finalnych.

Modele opisane powyżej zakładają jedną możliwość wykorzystania obiektów wycofanych z eksploatacji. Możliwość różnych sposobów zagospodarowania obiektów została opisana w pracach [10, 73]. W pracy [73] autorzy definiują zbiór kategorii produktu. Zapotrzebowanie zgłaszane na poszczególne kategorie wyrobu jest inne i może zostać zrealizowane poprzez produkcję nowych wyrobów lub odzysk obiektów wycofanych z eksploatacji. Produkty poszczególnych kategorii są składowane w osobnych magazynach. Autorzy zakładają, że produkty wycofane z eksploatacji są tej samej jakości i po realizacji procesów odzysku są tak dobre, jak nowe wyroby. W pracy [10] autorzy zakładają, że obiekty wycofane z eksploatacji różnią się jakością, co determinuje sposób ich późniejszego wykorzystania.

1.1.2. Modele stochastyczne

1.1.2.1. Modele utrzymania zapasów oparte na przeglądzie ciągłym

Heyman analizuje system, w którym zapotrzebowanie na nowe produkty $D(t)$ może zostać zaspokojone przez odzysk zwrotów lub zakup nowych produktów. Zapotrzebowanie na nowe wyroby oraz liczba zwrotów $Z(t)$ są niezależnymi zmiennymi losowymi, opisanymi rozkładem Poissona o parametrach λ_D oraz λ_Z . W systemie Heymana funkcjonuje jeden magazyn, w którym są składowane zwroty. Czasy realizacji procesów zakupu oraz odzysku są pomijane. Nowe wyroby nie są składowane. Jeżeli liczba produktów znajdujących się w magazynie jest niewystarczająca do pokrycia aktualnego zapotrzebowania, to uruchamiany jest proces zakupu. Nie ma ustalonych wielkości partii zakupowych oraz partii odzysku. Autor nie uwzględnia kosztów uruchomienia procesu odzysku i realizacji zamówień

zewnątrznych. Dopuszcza możliwość odrzucenia zwrotów. Zwroty są unieszkodliwiane, jeżeli po uruchomieniu procesu odzysku, stan zapasu dysponowanego $I_{poz}(t)$ w magazynie osiągnąłby wartość s_u . Zapas dysponowany to aktualnie dostępny zapas powiększony o złożone już zamówienia i pomniejszony o zlecenia oczekujące. W modelu Heymana:

$$I_{poz}(t) = I_z(t), \quad (1.67)$$

gdzie:

$I_z(t)$ - zapas zwrotów dostępny w chwili t .

Interesującym założeniem jest to, że koszt unieszkodliwienia zwrotów k_u może przyjmować wartości ujemne. Funkcja łącznych kosztów w chwili t przyjmuje następującą postać:

$$TC(t) = k_{zam} \cdot TQ_{zam}(t) + k_r \cdot TQ_{odz}(t) - k_u \cdot TQ_u(t) + k_{skz} \int_0^t I_z(x) dx, \quad (1.68)$$

gdzie:

$TQ_{zam}(t)$ - całkowita liczba produktów zakupionych z zewnątrz w chwili t ,

$TQ_{odz}(t)$ - całkowita liczba produktów poddanych procesom odzysku w chwili t ,

$TQ_u(t)$ - całkowita liczba produktów poddanych unieszkodliwieniu w chwili t .

Autor minimalizuje oczekiwaną wartość całkowitych kosztów funkcjonowania systemu. Heyman rozwiązuje problem wykorzystując teorię masowej obsługi. Zauważa, że $S_N(t) = s_u - I_z(t)$ odpowiada realizacji systemu kolejkowego $M/M/1/s_u$, z jednym stanowiskiem obsługi i ograniczonym rozmiarem kolejki równym s_u . Zgłoszenia przyjęte do systemu kolejkowego odpowiadają wystąpieniom zapotrzebowania zaspokajanego poprzez odzysk produktów znajdujących się w magazynie zwrotów. Każdorazowe przyjęcie zgłoszenia pociąga za sobą poniesienie kosztu odzysku k_r . Zgłoszenia do systemu kolejkowego są odrzucane w przedziałach czasu, w których $S_N(t) = s_u$. Odpowiada to sytuacji, w której magazyn zwrotów jest pusty i zapotrzebowanie jest zaspokajane poprzez zakup nowych produktów. W systemie kolejkowym $I_z(t)$ odpowiada liczbie wolnych miejsc w chwili t . Okresy przestoju systemu kolejkowego, w których $S_N(t) = 0$ odpowiadają sytuacji, w której magazyn zwrotów jest pełny, nie występuje zapotrzebowanie i wszystkie pojawiające się zwroty są unieszkodliwiane. W celu wyznaczenia liczby unieszkodliwianych zwrotów autor zakłada, że w systemie nie ma przestojów tylko są realizowane zadania poboczne. Do chwili kolejnego wystąpienia zapotrzebowania system funkcjonuje jak kolejka,

z nieograniczoną liczbą miejsc. Intensywność ruchu w systemie Heymana jest zapisywana w następujący sposób [46]:

$$\rho = \frac{\lambda_D}{\lambda_Z}. \quad (1.69)$$

Model opracowany przez Heymana został rozwinięty w pracy autorstwa Johna A. Muckstadta oraz Michaela H. Isaaca. Autorzy analizują system jedno- oraz dwupoziomowy.

W systemie jednopoziomowym, podobnie jak w pracy Heymana, zapotrzebowanie na wyroby finalne oraz zwroty produktów są niezależnymi zmiennymi losowymi, opisanymi rozkładem Poissona, o parametrach λ_D oraz λ_Z . Autorzy zakładają, że $\lambda_D > \lambda_Z$. Wprowadza to konieczność zakupu nowych wyrobów. Autorzy w przeciwieństwie do Heymana uwzględniają czas realizacji procesu zakupu. Produkty są dostarczane po T_{zam} jednostkach czasu. Wszystkie zwrócone produkty wymagają realizacji procesów odzysku. Odzysk jest realizowany zgodnie z systemem kolejkowym FIFO. Czasy realizacji odzysku są niezależnymi zmiennymi losowymi. Produkty procesu odzysku trafiają do magazynu wyrobów finalnych. Autorzy uwzględniają jeden magazyn dla produktów procesu odzysku oraz produktów dostarczanych w ramach zleceń zakupu. Autorzy dopuszczają możliwość wystąpienia braku w zapasie. Niezrealizowane zlecenia otrzymują status zleceń oczekujących. Zapas dysponowany w chwili t jest definiowany w następujący sposób:

$$I_{poz}(t) = I_{nett}(t) + I_z(t) + Q_{zam}(t), \quad (1.70)$$

gdzie:

$I_{nett}(t)$ - poziom zapasu netto w chwili t ,

$I_z(t)$ - liczba produktów znajdujących się w chwili t , w systemie kolejkowym tzn. oczekujących na odzysk,

$Q_{zam}(t)$ - wielkość partii zamówienia w trakcie realizacji w chwili t .

Poziom zapasu netto w chwili t jest wyznaczany ze wzoru:

$$I_{nett}(t) = I_{np}(t) - B(t), \quad (1.71)$$

gdzie:

$I_{np}(t)$ - dostępny zapas w magazynie wyrobów finalnych w chwili t ,

$B(t)$ - liczba produktów, które w chwili t posiadają status zleceń oczekujących.

Autorzy dostrzegają, że skoro czasy pomiędzy kolejnymi wystąpieniami zapotrzebowania oraz pojawianiem się zwrotów są opisane rozkładem wykładniczym, to możliwe jest sformułowanie łańcucha Markowa dla zapasu dysponowanego.

Ponieważ czas dostawy jest stały i wszystkie zamówienia złożone w chwili $t - T_{zam}$ są dostępne w chwili t , to wielkość zapasu netto może zostać zapisana w następujący sposób:

$$I_{nett}(t) = I_{poz}(t - T_{zam}) - I_z(t - T_{zam}) + Q_{odz}(t - T_{zam}, t) - D(t - T_{zam}, t), \quad (1.72)$$

gdzie:

$Q_{odz}(t - T_{zam}, t)$ - liczba produktów opuszczających system odzysku w przedziale czasu $(t - T_{zam}, t]$,

$D(t - T_{zam}, t)$ - wielkość zapotrzebowania zgłoszonego w przedziale czasu $(t - T_{zam}, t]$.

Autorzy aproksymują wielkość zapasu netto rozkładem normalnym. Zakładają, że nowe produkty są zamawiane natychmiast w liczbie $Q_{zam} \geq 1$, gdy stan zapasu dysponowanego w magazynie wyrobów finalnych spadnie poniżej wartości $s_p + 1$. Celem pracy jest wyznaczenie optymalnych wartości s_p oraz Q_{zam} przy założeniu ciągłej pracy systemu odzysku.

W modelu kosztowym minimalizowana funkcja celu ma następującą postać:

$$\begin{aligned} \overline{TC} = & \frac{(\lambda_D - \lambda_Z) \cdot K_{zam}}{Q_{zam}} + (k_B + k_{sknp}) \left[\sigma \cdot \varphi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) - \mu \cdot \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) \right], \\ & + k_{sknp} \left(s_p + \frac{Q_{zam}}{2} + c \right) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1.73)$$

gdzie:

$$\mu = s_p + \frac{Q_{zam}}{2} + c, \quad (1.74)$$

$$\sigma^2 = \frac{Q_{zam}^2}{12} + c_1, \quad (1.75)$$

$$c = \frac{\lambda_Z}{\lambda_D - \lambda_Z} + \frac{1}{2} - E(I_z(t)) - (\lambda_D - \lambda_Z)T_{zam}, \quad (1.76)$$

$$c_1 = \frac{\lambda_Z \cdot \lambda_D}{(\lambda_D - \lambda_Z)^2} - \frac{1}{12} + Var(I_z(t)) + (\lambda_D + \lambda_Z)T_{zam}, \quad (1.77)$$

k_B - jednostkowy koszt zlecenia oczekującego .

μ oraz σ^2 to średnia i wariancja rozkładu normalnego, którym opisana jest wielkość zapasu netto. Natomiast $\varphi(\cdot)$ i $\Phi(\cdot)$ to odpowiednio funkcja gęstości oraz dystrybuanta standardowego rozkładu normalnego.

W systemie dwupoziomowym na najwyższym poziomie znajduje się magazyn centralny, w którym realizowane są procesy odzysku. Do tego magazynu dostarczane są również nowe produkty kupione u zewnętrznych dostawców. Niższy poziom zawiera S sprzedawców, którzy posiadają tylko magazyny. Zapotrzebowanie $D^j(t)$ oraz zwroty $Z^j(t)$ kierowane do poszczególnych sprzedawców są opisane rozkładem Poissona o parametrach λ_D^j oraz λ_Z^j , gdzie $j = 1, 2, \dots, S$. Zwroty są natychmiast przekazywane do magazynu centralnego, gdzie są poddawane procesom odzysku, zgodnie z systemem kolejkowym FIFO. Zwroty do magazynu centralnego $Z(t)$ są opisane rozkładem Poissona o parametrze:

$$\lambda_Z = \sum_{j=1}^S \lambda_Z^j. \quad (1.78)$$

Produkty procesu odzysku nie muszą trafić do tego samego sprzedawcy, od którego zostały przekazane do magazynu centralnego. Autorzy zakładają brak możliwości przekazywania dóbr pomiędzy poszczególnymi sprzedawcami. Czas dostawy T_{CE} z magazynu centralnego do magazynu znajdującego się na niższym poziomie jest stały i taki sam dla wszystkich sprzedawców.

Autorzy zakładają również, że każdy j -ty sprzedawca stosuje ciągłą politykę zamówień $(s_p^j - 1, s_p^j)$. Sprzedawca składa zamówienie na jeden produkt z magazynu centralnego, gdy tylko pojawi się na niego zapotrzebowanie. Dzięki czemu wielkość zapotrzebowania w magazynie centralnym $D(t)$ pozostaje opisana za pomocą rozkładu Poissona o parametrze:

$$\lambda_D = \sum_{j=1}^S \lambda_D^j. \quad (1.79)$$

Autorzy zakładają różne koszty składowania w magazynie centralnym k_{sknp} i w magazynie znajdującym się u j -tego sprzedawcy k_{sknp}^j oraz różne koszty zleceń oczekujących k_b^j dla poszczególnych sprzedawców. Celem pracy jest wyznaczenie optymalnych wartości Q_{zam} , s_p oraz s_p^j . Muckstadt oraz Isaac formułują następujący problem optymalizacyjny:

$$\min_{Q_{zam}, s_p, s_p^j} \left\{ \sum_{j=1}^S (k_{sknp}^j \cdot E(I_{np}^j(t)) + k_b^j \cdot E(B^j(t))) + K_{zam} \cdot \frac{\lambda_D - \lambda_Z}{Q_{zam}} + k_{sknp} \cdot E(I_{np}(t)) \right\}, \quad (1.80)$$

gdzie:

$$Q_{zam} \geq 1, \quad s_p \geq 1, \quad \text{oraz} \quad s_p^j = 0, 1, \dots$$

Autorzy w pracy prezentują algorytm umożliwiający rozwiązanie postawionego problemu. W algorytmie porównywane są koszty składowania w magazynie centralnym oraz koszty składowania i zleceń oczekujących u poszczególnych sprzedawców [96].

Przedstawiony wcześniej wielopoziomowy model opracowany przez Johna A. Muckstadta oraz Michaela H. Isaaca zakłada brak możliwości unieszkodliwiania zwrotów. Autorami, którzy znoszą to ograniczenie są Aybek Korugan oraz Surendra M. Gupta. Zapotrzebowanie na nowe wyroby oraz zwroty pozostają opisane rozkładem Poissona. W przeprowadzanych obliczeniach autorzy zakładają, że istnieje jeden sprzedawca, do którego zwroty trafiają zgodnie z parametrem:

$$\lambda_z = \sum_{j=1}^s \lambda_z^j. \quad (1.81)$$

Korugan oraz Gupta tworzą kolejkowy model systemu, w którym zwroty są zbierane i składowane w magazynie znajdującym się u sprzedawcy. Co pewien czas produkty są transportowane do magazynu zwrotów znajdującego się na wyższym poziomie, w którym realizowane są procesy odzysku. Czas transportu jest czasem obsługi dla pierwszego stanowiska w kolejce i jest opisany rozkładem wykładniczym o parametrze λ_t . Wydajność procesu odzysku jest opisana rozkładem wykładniczym o parametrze λ_{odz} . Produkty procesu odzysku są składowane w magazynie wyrobów finalnych, do którego kierowane jest zapotrzebowanie $D(t)$. Autorzy zakładają, że $\lambda_D > \lambda_z$. Różnica tych parametrów opisuje wyjście procesu produkcji:

$$Q_{prod} = \lambda_D - \lambda_z. \quad (1.82)$$

Wielkości magazynów znajdujących się w systemie są ograniczone. Dla kolejnych magazynów wynoszą odpowiednio LM_1 , LM_2 oraz LM_3 . Autorzy nie uwzględniają zleceń oczekujących. Jeżeli w chwili zgłoszenia zapotrzebowania magazyn wyrobów finalnych jest pusty to zlecenie jest tracone. Proces unieszkodliwiania zwrotów jest uruchamiany, w chwili zapelnienia się magazynu zwrotów znajdującemu się u sprzedawcy. Korugan oraz Gupta tworzą następujący model kosztowy:

$$\overline{TC} = \lim_{H \rightarrow \infty} \frac{1}{H} \int_0^H \left[k_{skz}^s \cdot I_z^s(t) + k_{skz}^w \cdot I_z^w(t) + k_{skup} \cdot I_{np}(t) + k_u \cdot Q_u(t) + k_b \cdot B(t) + k_t \cdot Q_t(t) + k_r \cdot Q_{odz}(t) + k_p \cdot Q_{prod}(t) \right] dt, \quad (1.83)$$

gdzie:

k_{skz}^s - koszt składowania w magazynie zwrotów sprzedawcy,

k_{skz}^w - koszt składowania w magazynie zwrotów w warsztacie,

k_{sknp} - koszt składowania w magazynie wyrobów finalnych,

k_b - koszt utraconej sprzedaży,

k_t - koszt transportu,

$I_z^s(t)$ - wielkość zapasu w magazynie zwrotów sprzedawcy w chwili t ,

$I_z^w(t)$ - wielkość zapasu w magazynie zwrotów w warsztacie w chwili t ,

$Q_u(t)$ - wielkość partii w procesie unieszkodliwiania w trakcie realizacji w chwili t ,

$B(t)$ - wielkość utraconej sprzedaży w chwili t ,

$Q_t(t)$ - wielkość partii transportowej w chwili t ,

$Q_{odz}(t)$ - wielkość partii odzysku w trakcie realizacji w chwili t ,

$Q_{prod}(t)$ - wielkość partii produkcji w trakcie realizacji w chwili t .

Korugan oraz Gupta analizują przedstawiony model wykorzystując metodę ekspansji. Sprawdzają wpływ poszczególnych parametrów na wielkość ponoszonych kosztów. Korzystają z założenia, że $k_t + k_r < k_p + k_u$ [81].

Model dwupoziomowego systemu opartego na ciągłym przeglądzie poziomu zapasów został przedstawiony również w pracy [93]. Pierwszy poziom obejmuje dystrybutora produktów, drugi producenta. Na pierwszym poziomie znajduje się wyłącznie magazyn wyrobów finalnych. Na drugim poziomie umieszczono magazyn zwrotów oraz drugi magazyn wyrobów finalnych. Opracowany model, poprzez uwzględnienie stałych kosztów uruchomienia procesów, jest rozwinięciem pracy [81].

Prace Johna A. Muckstadta oraz Michaela H. Isaaca kontynuuje również grupa autorów, do których należą: Ervin van der Laan, Rommert Dekker, Marc Salomon oraz Ad Ridder. Autorzy analizują system jednopoziomowy. Zapotrzebowanie na nowe wyroby oraz liczba zwrotów są wielkościami losowymi opisanymi, tak jak w pracy poprzedników, rozkładem Poissona o odpowiednich parametrach. Autorzy opracowują dwie procedury aproksymacji, które porównują z procedurą Muckstadta oraz Isaaca. Van der Laan, Dekker, Salomon oraz Ridder w pierwszej aproksymacji zakładają, że zapas netto w czasie dostawy produktów z zewnątrz ma rozkład normalny. W drugiej różnicę pomiędzy popytem, a wyjściem procesu odzysku, opisują wykorzystując teorię ruchów Browna. Autorzy zauważają, że zwiększenie liczby zwrotów nie prowadzi do zmniejszenia średnich kosztów. Jest to związane z rosnącymi kosztami utrzymania zwróconych produktów. Dlatego wprowadzają możliwość unieszkodliwiania pewnej części zwrotów. Zwroty są unieszkodliwiane na poziomie

magazynu, w którym są realizowane procesy odzysku. Nie są unieszkodliwiane produkty, które znajdują się w magazynie wyrobów finalnych. Decyzja o unieszkodliwieniu zwróconego produktu jest podejmowana na podstawie informacji o liczbie produktów oczekujących na odzysk. Autorzy zakładają, że w systemie odzysku znajduje się C_q równoległych stanowisk, z czasem obsługi opisanym rozkładem wykładniczym. System posiada poczekalnię. Jeżeli w poczekalni znajduje się s_u produktów, to każdy kolejny poddawany jest unieszkodliwianiu [156].

W późniejszej pracy van der Laan i Salomon analizują opracowane wcześniej strategie zarządzania zapasami w logistyce zwrotów. Przeprowadzają porównanie strategii Heymana, Muckstadta i Isaaca, oraz swojej. W tym celu opracowują politykę opartą o cztery parametry: s_p, Q_{zam}, s_u, s_q . W tej strategii unieszkodliwianie zwrotów jest realizowane w dwóch przypadkach: gdy stan zapasu dysponowanego osiągnie wartość s_q oraz gdy liczba produktów oczekujących na odzysk w magazynie zwrotów jest równa s_u . Numerycznemu porównaniu poddawana jest polityka (s_p, Q_{zam}, s_u, s_q) oraz jej warianty: (s_p, Q_{zam}, s_u) i (s_p, Q_{zam}, s_q) . Autorzy udowadniają, że strategia (s_p, Q_{zam}, s_u, s_q) pozwala na osiągnięcie najniższych kosztów. Minusem tej polityki jest duży stopień skomplikowania obliczeń prowadzących do wyznaczenia rozwiązania optymalnego. Autorzy stwierdzają, że większe zastosowanie w praktyce mogą mieć wymienione wcześniej warianty (s_p, Q_{zam}, s_q) i (s_p, Q_{zam}, s_u) . Pokazują, że w większości przeprowadzonych porównań pierwszy wariant, pozwolił na osiągnięcie niższych kosztów [155]. Różne polityki utrzymania zapasów są porównywane również w pracy [1].

Ervin van der Laan w swoich pracach zajmuje się również analizą porównawczą systemów ssących i pchających w logistyce zwrotów. Wraz z M. Salomonem prezentują uproszczoną wersję systemu stosowanego w praktyce przez producentów kopiarek.

W systemie znajduje się magazyn zwrotów oraz magazyn wyrobów finalnych, w którym składowane są wyroby nowe i produkty procesu odzysku. Wszystkie zwrócone produkty mogą zostać ponownie wykorzystane. Pewna część produktów znajdujących się w magazynie zwrotów jest poddawana unieszkodliwianiu. Czasy pomiędzy kolejnymi wystąpieniami popytu oraz kolejnym pojawieniem się zwrotów są opisane za pomocą rozkładu Coxa. Autorzy zakładają, że zwroty oraz popyt są skorelowane, tzn. istnieje pewne prawdopodobieństwo p_c , że zwrot produktu pociągnie za sobą wystąpienie zapotrzebowania.

Autorzy dopuszczają możliwość wystąpienia braku w zapasie, co prowadzi do powstania zleceń oczekujących. Zakładają stałe czasy dostaw z produkcji i odzysku.

W systemie pchającym autorzy stosują politykę $(s_p, Q_{prod}, Q_{odz}, s_q)$, w której proces odzysku jest uruchamiany, gdy poziom zapasu w magazynie zwrotów osiągnie wartość Q_{odz} . Proces produkcji Q_{prod} sztuk wyrobu jest uruchamiany, gdy stan zapasu dysponowanego w magazynie wyrobów finalnych spadnie do poziomu s_p . Proces unieszkodliwiania jest uruchamiany, jeżeli stan zapasu dysponowanego jest większy bądź równy s_q .

W systemie ssącym autorzy proponują politykę $(s_p, Q_{prod}, s_r, S_r, s_u)$, w której proces odzysku jest uruchamiany, gdy stan zapasu dysponowanego w magazynie wyrobów finalnych jest mniejszy lub równy s_r i w magazynie zwrotów znajduje się wystarczająca liczba produktów, żeby zwiększyć stan zapasu dysponowanego do wartości S_r . Produkcja Q_{prod} sztuk wyrobu jest uruchamiana, gdy stan zapasu dysponowanego spadnie do poziomu $s_p \leq s_r$. Unieszkodliwianie jest uruchamiane, jeżeli poziom zapasu w magazynie zwrotów osiągnie wartość s_u . Po przeprowadzeniu analizy porównawczej prezentowanych systemów autorzy stwierdzają, że stosowanie systemu ssącego jest bardziej opłacalne, tylko w przypadku, gdy koszty utrzymania zapasu w magazynie zwrotów są znacząco niższe, niż w magazynie wyrobów finalnych [157].

Kolejnymi autorami, którzy rozwijają teorię zarządzania zapasami w logistyce zwrotów są Moritz Fleischmann, Reolof Kuik oraz Rommert Dekker. Opracowują prosty model (s_p, Q_{zam}) zarządzania zapasami w logistyce zwrotów. Autorzy w swojej pracy cofają się do modelu Johna A. Muckstadta oraz Michaela H. Isaaca. Analizują uproszczony przypadek, w którym zwrócone produkty podlegają bezpośredniemu wykorzystaniu i są składowane w tym samym magazynie co nowe produkty. Nowe produkty są pozyskiwane w drodze zakupu. Czas dostawy jest stały. Zapotrzebowanie na nowe produkty oraz liczba zwrotów są niezależnymi zmiennymi losowymi opisanymi rozkładem Poissona. Autorzy zauważają, że liczba zwrotów mogłaby być modelowana w funkcji występującego wcześniej zapotrzebowania. Stwierdzają jednak, że oszacowanie takiej zależności jest niezwykle trudne w praktyce. Zlecenia niezrealizowane otrzymują status oczekujących. Autorzy uwzględniają koszty uruchomienia zlecenia zakupu, jednostkowe koszty składowania produktów oraz realizacji zleceń oczekujących. Celem pracy jest wyznaczenie optymalnej polityki minimalizującej funkcję

średnich kosztów ponoszonych w wyznaczonym okresie. Model Fleischmanna, Kuika oraz Dekkera jest prostym rozwinięciem klasycznego modelu zarządzania zapasami [30].

Na uwagę zasługuje również inna praca autorstwa Fleischmana oraz Kuika. W pracy [32] autorzy prezentują model oparty o politykę (S_p, s_p) . Zapotrzebowanie na nowe wyroby oraz liczba zwróconych obiektów są opisane niezależnymi zmiennymi losowymi. Opracowany model opiera się na założeniu, że obiekty wycofane z eksploatacji są umieszczane bezpośrednio w magazynie wyrobów finalnych. Założenie to jest właściwe dla opakowań wielokrotnego użytku. Autorzy uwzględniają również możliwość realizacji zleceń oczekujących. Sposób praktycznego wykorzystania modelu zaprezentowanego w [32] został przedstawiony na przykładzie firmy IBM w pracy [34].

W kolejnej pracy poświęconej zarządzaniu zapasami w logistyce zwrotów Huiqing Ouyang oraz Xiangyang Zhu zauważają, że większość opracowanych wcześniej modeli opiera się na założeniu, że liczba zwrotów nie przewyższa zapotrzebowania. Stwierdzają, że istniejące modele nie opisują końcowego etapu życia produktów, kiedy liczba zwracanych produktów może znacznie przewyższać zapotrzebowanie na te wyroby. Huiqing Ouyang oraz Xiangyang Zhu opracowują politykę zarządzania zapasami (s_p, Q_{zam}, s_q) , która uwzględnia taką możliwość. Taka sama polityka postępowania prezentowana jest w jednej z prac Ervina van der Laana, ale bez uwzględnienia kosztów składowania zwrotów. Autorzy w modelu wyróżniają dwa magazyny: magazyn zwrotów oraz wyrobów finalnych. Magazyn wyrobów finalnych jest zasilany przez odzysk wartości ze zwrotów lub przez zakup surowca i produkcję nowych wyrobów. Tak jak w większości wcześniejszych prac odzysk ma wyższy priorytet. Zapotrzebowanie na nowe wyroby oraz zwroty są niezależne i opisane rozkładem Poissona. Odzysk produktów jest modelowany przy wykorzystaniu systemu kolejkowego FIFO. Czas odzysku jest opisany rozkładem wykładniczym. Zapas dysponowany w chwili t jest obliczany w taki sam sposób jak w modelu Johna A. Muckstadta oraz Michaela H. Isaaca. Huiqing Ouyang oraz Xiangyang Zhu dopuszczają możliwość wystąpienia zleceń oczekujących ale tylko wtedy, gdy magazyn wyrobów finalnych ma zostać zasilony z produkcji. Autorzy zakładają również, że nie może być aktywne więcej niż jedno zlecenie zakupu [107].

1.1.2.2. Modele utrzymania zapasów oparte na przeglądzie okresowym

Pierwszy model opisujący system zarządzania zapasami oparty na przeglądzie okresowym opracował V. P. Simpson. W modelu Simpsona zapotrzebowanie na nowe produkty D_T oraz

liczba zwrotów Z_T , w okresie T , gdzie $T=1,2,3,\dots,H$, są niezależnymi zmiennymi losowymi. Jedynym co łączy te zmienne jest znana funkcja gęstości prawdopodobieństwa dwóch zmiennych $\Omega_T(D_T, Z_T)$. W modelu Simsona funkcjonują dwa magazyny: magazyn zwrotów oraz magazyn wyrobów finalnych. Na początku każdego okresu korygowane są poziomy zapasu $I_{np,T}$ w magazynie wyrobów finalnych oraz $I_{z,T}$ w magazynie zwrotów. Poziom zapasu w magazynach może ulec zmianie na skutek zakupu nowych wyrobów w ilości $Q_{zam,T}$, odzysku zwrotów w liczbie $Q_{odz,T}$ oraz unieszkodliwieniu $Q_{u,T}$ zwrotów. Czasy realizacji procesu odzysku i zakupu są pomijane. Koszty zakupu i odzysku jednej sztuki wyrobu są stałe i wynoszą odpowiednio k_{zam} oraz k_r . Autor nie uwzględnia kosztów związanych z unieszkodliwianiem zwrotów. W modelu Simpsona monitorowana jest wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania. Koszty składowania w magazynie wyrobów finalnych są obliczane dla każdego okresu. Funkcja łącznych kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania oraz składowania w magazynie wyrobów finalnych dla okresu T , przyjmuje następującą postać:

$$TC_{1,T}(I_{np}) = k_{snp} \int_0^\infty \int_0^I (I_{np} - x) \Omega_T(x, y) dx dy + k_b \int_0^\infty \int_I^\infty (x - I_{np}) \Omega_T(x, y) dx dy, \quad (1.84)$$

gdzie:

k_{snp} - koszt składowania jednej sztuki wyrobu w magazynie wyrobów finalnych,

k_b - koszt braku w zapasie,

I_{np} - początkowy stan zapasu w magazynie wyrobów finalnych,

I_z - początkowy stan zapasu w magazynie zwrotów.

Koszt składowania jednej sztuki zwróconego produktu w magazynie zwrotów wynosi k_{skz} .

Całkowity koszt składowania zwrotów $TC_{2,T}(I_z)$ jest obliczany analogicznie do kosztu składowania oraz niezrealizowanego zapotrzebowania w magazynie wyrobów finalnych. Do wyznaczenia optymalnej wielkości kosztów Simpson wykorzystuje programowanie dynamiczne i formułuje następujący problem optymalizacyjny:

$$TC_T(I_{np}, I_z) = \min \left\{ \begin{array}{l} k_r Q_{odz,T} + k_{zam} + TC_{2,T}(I_z - Q_{odz,T} - Q_{u,T}) + \\ + TC_{1,T}(I_{np} + Q_{odz,T} + Q_{zam,T}) + \\ + \mu \int_0^\infty \int_0^\infty A_{T-1}(I_{np} + Q_{odz,T} + Q_{zam,T} - x, I_z - Q_{odz,T} - Q_{u,T} + y) \Omega_T dy dx \end{array} \right\}, \quad (1.85)$$

gdzie:

$\int \int A_{T-1}(\cdot, \cdot) \Omega_T dy dx$ - optymalna wartość dla okresów $T-1, T-2, \dots, 1$,

μ - współczynnik dyskontowania.

Rekurencyjna zależność pomiędzy poziomami zapasu w magazynie wyrobów finalnych i magazynie zwrotów w poszczególnych okresach jest następująca:

$$I_{np,T-1} = I_{np,T} + Q_{odz,T} + Q_{zam,T} - D_T, \quad (1.86)$$

$$I_{z,T-1} = I_{z,T} - Q_{odz,T} - Q_{u,T} + Z_T. \quad (1.87)$$

Simpson opracowuje politykę postępowania $(S_{p,T}, S_{r,T}, s_{u,T})$ według której, jeżeli poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych jest mniejszy niż $S_{r,T}$, to zapas jest uzupełniany przez odzysk zwrotów. Jeżeli po podjęciu decyzji o uruchomieniu odzysku poziom zapasu znajdującego się w magazynie zwrotów oraz magazynie wyrobów finalnych jest mniejszy niż $S_{p,T}$, to zapas jest uzupełniany przez zakup nowych produktów. Jeżeli po tych decyzjach łączny zapas znajdujący się w magazynie zwrotów oraz magazynie wyrobów finalnych jest większy niż $S_{r,T} + s_{u,T}$, to uruchamiany jest proces unieszkodliwiania zwrotów do poziomu $S_{r,T} + s_{u,T}$.

Do wyznaczenia minimum funkcji łącznych kosztów Simpson wykorzystuje twierdzenia Kuhna–Tuckera [135].

Model o zbliżonych założeniach opracowuje Karl Inderfurth. W przeciwieństwie do swojego poprzednika uwzględnia czasy realizacji procesu odzysku T_{odz} oraz dostawy nowych produktów T_{zam} wyrażone w liczbie okresów. Niezrealizowane zapotrzebowanie przyjmuje postać zlecenia oczekującego. Inderfurth w swojej pracy analizuje dwa przypadki: w pierwszym nie dopuszcza możliwości składowania zwrotów, a w drugim znosi to ograniczenie. Inderfurth dąży do zminimalizowania łącznych kosztów dla wszystkich okresów w wyznaczonym horyzoncie planowania H .

$$TC = E \left\{ \sum_{T=1}^H \left[TC_{zou} (Q_{zam,T}, Q_{odz,T}, Q_{u,T}) + K_{skz} (I_{z,T}) + K_{sknp} (I_{np,T}) \right] \right\} \rightarrow \min, \quad (1.88)$$

gdzie:

$TC_{zou} (Q_{zam,T}, Q_{odz,T}, Q_{u,T})$ - to łączne koszty zakupu, odzysku oraz unieszkodliwiania w okresie T ,

$K_{sknp} (I_{np,T})$ - łączne koszty składowania wyrobów finalnych w okresie T ,

$K_{skz}(I_{z,T})$ - łączne koszty składowania zwrotów w okresie T ,

$I_{np,T}$ - dostępna wielkość zapasu w magazynie wyrobów finalnych na koniec okresu T ,

$I_{z,T}$ - dostępna wielkość zapasu w magazynie zwrotów na koniec okresu T ,

$$I_{np,T} = I_{np,T-1} + Q_{zam,T-L_{zam}} + Q_{odz,T-L_{odz}} - D_T, \quad (1.89)$$

$$I_{z,T} = I_{z,T-1} + Z_T - Q_{odz,T} - Q_{u,T}. \quad (1.90)$$

Inderfurth zauważa, że czynnikiem mającym istotny wpływ na poziom skomplikowania modelu jest różnica pomiędzy T_{odz} oraz T_{zam} . Inderfurth opracowuje optymalną politykę utrzymania zapasów w przypadku, gdy różnica ta jest mniejsza bądź równa jeden okres.

W najprostszym przypadku, gdy zwroty nie są składowane a $T_{odz} = T_{zam} = T_{op}$ Inderfurth stosuje politykę $(S_{p,T}, s_{q,T})$, gdzie $-\infty \leq S_{p,T} \leq s_{q,T} \leq +\infty$. Według tej polityki, jeżeli dysponowany zapas $I_{poz,T}$ jest mniejszy niż $S_{p,T}$, to uruchamiany jest proces odzysku wszystkich zwrotów znajdujących się w magazynie. Jeżeli po odzysku zapas dysponowany jest dalej mniejszy niż $S_{p,T}$, to uruchamiany jest zakup nowych produktów. Proces unieszkodliwiania jest uruchamiany, jeżeli stan zapasu dysponowanego jest większy niż $s_{q,T}$. Unieszkodliwiany jest nadmiar zapasu, a pozostałe zwroty poddawane są procesom odzysku. Zapas dysponowany jest wyznaczany w oparciu o aktualny stan zapasu, zwroty z poprzedniego okresu, zlecenia zakupu oraz odzysku będące w trakcie realizacji oraz rezerwacje zapasu w ramach zleceń oczekujących [57].

Wpływ parametrów T_{odz} oraz T_{zam} na proces zarządzania zapasami w systemach opartych na przeglądzie ciągłym oraz okresowym został szczegółowo omówiony przez Inderfurtha w pracy [58]. Autor proponuje politykę utrzymania zapasów, w której parametr T_{odz} jest zmienną decyzyjną.

Model przedstawiony w [57, 135] został szczegółowo przeanalizowany przez Kiesmüllera oraz Scherera w pracy [69]. Autorzy wykorzystują symulację komputerową do wyznaczenia parametrów analizowanego modelu.

Kolejnym autorem, który analizuje proces zarządzania zapasami w systemie opartym na przeglądzie okresowym jest Stefan Miner. Autor w pracy [92] analizuje zagadnienie zapasu bezpieczeństwa w modelu przedstawionym przez Simpsona w pracy [135].

Na zainteresowanie zasługuje również model wielopoziomowego systemu zarządzania zapasami przedstawiony w pracy [13]. Model ten jest rozwinięciem prac Simpsona oraz

Inderfurtha. Decroix prezentuje system składający się z m połączonych szeregowo poziomów. Zapotrzebowanie na nowe wyroby jest kierowane do magazynu znajdującego się na pierwszym poziomie. Obiekty wycofane z eksploatacji są składowane w magazynie zwrotów, skąd po przeprowadzeniu procesów odzysku mogą zostać przeniesione do magazynu znajdującego się na dowolnym poziomie. W kolejnej pracy [14] Decroix przedstawia model systemu montażowego. W opracowanym modelu w procesie montażu mogą zostać wykorzystane produkty procesu odzysku.

Kolejnymi autorami zajmującymi się problematyką utrzymania zapasów w systemach logistyki zwrotów są G.P. Kiesmuller oraz S. Minner. Opracowują model, w którym zapotrzebowanie na wyroby finalne D_T w poszczególnych okresach jest niezależną zmienną losową o takim samym rozkładzie prawdopodobieństwa. Znana jest dystrybuanta F_D i wartość oczekiwana λ_D . Niezrealizowane zapotrzebowanie przyjmuje postać zleceń oczekujących. Zwroty Z_T są opisane analogicznie do zapotrzebowania. Znana jest dystrybuanta F_Z i wartość oczekiwana λ_Z . Różnica pomiędzy zapotrzebowaniem na nowe wyroby, a liczbą zwrotów jest opisana dystrybuantą F_{D-Z} . Autorzy zakładają, że liczba zwrotów jest niezależna od zapotrzebowania. Kiesmüller i Minner nie uwzględniają unieszkodliwiania zwrotów. Zakładają, że wszystkie zwroty mogą zostać ponownie wykorzystane. Autorzy modelują system produkcyjny, w którym magazyn wyrobów finalnych jest zasilany z produkcji i odzysku. Uwzględniają czasy realizacji procesu produkcji i odzysku. Zakładają, że przegląd zapasów realizowany jest na początku każdego okresu. Liczba produktów, które mają być wytworzone lub odzyskane jest uzależniona od polityki (S_p, S_r) . Decyzje o wielkości produkcji i odzysku są podejmowane jednocześnie, ale odzysk posiada wyższy priorytet. Do wyznaczenia wielkości produkcji służy wielkość zapasu dysponowanego $I_{pozp,T}$. Wielkość odzysku jest wyznaczana za pomocą zapasu dysponowanego $I_{poz,T}$.

$$Q_{prod,T} = (S_p - I_{pozp,T})^+, \quad (1.91)$$

$$Q_{odz,T} = \min \left\{ I_{z,T}, (S_r - I_{poz,T})^+ \right\}, \quad (1.92)$$

gdzie:

$I_{z,T}$ - dostępny zapas zwrotów w okresie T .

W przypadku, gdy $T_{odz} = T_{prod} = T_{op}$ autorzy definiują $I_{poz,T}$ jako sumę dostępnego zapasu wyrobów finalnych i uruchomionych zleceń produkcyjnych oraz zleceń odzysku pomniejszoną o zlecenia oczekujące. Ponieważ odzysk ma wyższy priorytet, to przy wyznaczaniu $I_{pozp,T}$ należy dodatkowo uwzględnić dostępny zapas zwrotów.

$$I_{pozp,T} = I_{z,T} + I_{np,T} + \sum_{i=1}^{T_{op}} (Q_{prod,T-i} + Q_{odz,T-i}). \quad (1.93)$$

$$I_{poz,T} = I_{np,T} + \sum_{i=1}^{T_{op}} (Q_{prod,T-i} + Q_{odz,T-i}). \quad (1.94)$$

W przypadku, gdy $T_{odz} > T_{prod}$:

$$I_{pozp,T} = I_{np,T} + \sum_{i=1}^{T_{prod}} Q_{prod,T-i} + \sum_{i=0}^{T_{odz}} Q_{odz,T-(T_{odz}-T_{prod}+i)}, \quad (1.95)$$

$$I_{poz,T} = I_{np,T} + \sum_{i=0}^{T_{prod}} Q_{prod,T-i} \sum_{i=1}^{T_{odz}} Q_{odz,T-i}. \quad (1.96)$$

W przypadku, gdy $T_{odz} < T_{prod}$:

$$I_{pozp,T} = I_{np,T} + I_{z,T} + \sum_{i=1}^{T_{prod}} Q_{prod,T-i} + \sum_{i=1}^{T_{odz}} Q_{odz,T-i}, \quad (1.97)$$

$$I_{poz,T} = I_{np,T} + \sum_{i=0}^{T_{prod}} Q_{prod,T-(T_{prod}-T_{odz}+i)} \sum_{i=1}^{T_{odz}} Q_{odz,T-i}. \quad (1.98)$$

Kiesmuller i Minner opracowują następujący model kosztowy [66, 67]:

$$\overline{TC} = k_{sknp} E[I_{np}^+] + k_{skz} E[I_z] + k_B E[I_{np}^-] \rightarrow \min. \quad (1.99)$$

Mahadevan, Pyke oraz Fleischmann modelują system produkcyjny, w którym zwroty oraz zapotrzebowanie na wyroby finalne są opisane rozkładem Poissona o parametrach λ_D oraz λ_Z . W systemie znajduje się magazyn zwrotów oraz magazyn wyrobów finalnych. Koszty składowania we wcześniej wspomnianych magazynach są różne. Autorzy uwzględniają czas dostawy nowych produktów oraz czas trwania procesu odzysku. Wielkości te są stałe. Niezrealizowane zapotrzebowanie przyjmuje formę zlecenia oczekującego. W opisywanym systemie przegląd jest realizowany co T_{prz} okresów. Wszystkie zwroty, które znajdują się w danych chwili w magazynie zwrotów są poddawane procesowi odzysku. Liczność partii odzysku $Q_{odz,T}$ jest wielkością losową. Produkcja nowych wyrobów jest uruchamiana, jeżeli stan zapasu dysponowanego $I_{poz,T}$ w momencie przeglądu jest mniejszy niż docelowy poziom

zapasu S_p . Wielkość partii produkcyjnej $Q_{prod,T}$ jest równa różnicy tych wielkości. Autorzy minimalizują funkcję łącznych kosztów poprzez wybór odpowiedniej wartości docelowego poziomu zapasu S_p . Zmiana wartości zmiennej T_{prz} służy do regulacji wielkości partii produkcji i odzysku. Autorzy zakładają, że T_{prz} jest dane. Do obliczeń stosują heurystykę, tworzą model symulacyjny, korzystając z systemu PROMODEL. Funkcja łącznych kosztów przyjmuje następującą postać:

$$\overline{TC} = k_{skup} \bar{I}_{np} + k_{skz} \bar{I}_z + k_b \frac{\bar{B}_o}{T_{prz}}, \quad (1.100)$$

gdzie:

\bar{I}_{np} - średni poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych,

\bar{I}_z - średni poziom zapasu w magazynie zwrotów,

\bar{B}_o - średnia liczba zleceń oczekujących [87, 113].

Zagadnienie utrzymania zapasów w systemie opartym na przeglądzie okresowym analizują w swojej pracy również M. A. Cohen, S. Nahmias oraz W. P. Pierskalla. Model ten należy do pierwszej grupy modeli stochastycznych. Jednakże został przedstawiony ponieważ stanowi źródło inspiracji dla późniejszych prac, należących do drugiej grupy modeli stochastycznych. W tym systemie każdy uszkodzony produkt jest zastępowany nowym. Zapotrzebowanie jest więc równe liczbie zwrotów. Uszkodzone produkty są zwracane do centrum odzysku, z którego po czasie T_{odz} wyrażonym w liczbie okresów, są dostarczane do magazynu wyrobów finalnych. Pewna część $(1 - \delta)$ zwróconych produktów nie może zostać ponownie wykorzystana i opuszcza system. Niedobór produktów jest uzupełniany przez zakup nowych wyrobów, a czas dostawy nowych produktów jest pomijany. Zapotrzebowanie w poszczególnych okresach jest niezależną zmienną losową, ale o takim samym rozkładzie prawdopodobieństwa. W każdym okresie $(1 - \delta_z)$ zapasu ulega zepsuciu i przestaje być składowane. Autorzy nie uwzględniają zleceń oczekujących, nadwyżka popytu jest tożsama z utraconą sprzedażą. W zapasie dysponowanym nie ma uwzględnionych zamówień będących w trakcie realizacji, ponieważ nowe produkty są dostarczane w chwili złożenia zamówienia. Na początku każdego okresu, po ewentualnym dostarczeniu produktów procesu odzysku, w magazynie znajduje się $I_{poz,T}$ sztuk wyrobu. Po realizacji zamówienia na nowe wyroby w magazynie ma się znajdować $S_{p,T}$ produktów. Wielkość partii zamówienia $Q_{zam,T}$ jest równa $S_{p,T} - I_{poz,T}$. Autorzy uwzględniają jednostkowy koszt zamówienia. Nie uwzględniają stałych

kosztów obsługi zamówienia. Funkcja łącznych kosztów składowania oraz kosztów utraconej sprzedaży dla jednego okresu przyjmuje następującą postać:

$$TC_1 = E \left\{ k_{sknp} \left[(S_p - D)^+ \right] + k_b \left[(D - S_p)^+ \right] + k_{zep} (1 - \delta_z) (S_p - D)^+ \right\} = \int_0^{I_{zam}} (S_p - t) f(t) dt + \int_{I_{zam}}^{\infty} k_b (t - S_p) f(t) dt + k_{zep} (1 - \delta_z) \int_0^{I_{zam}} (S_p - t) f(t) dt, \quad (1.101)$$

gdzie:

k_{zep} - jednostkowy koszt zepsucia się produktu.

W funkcji całkowitych kosztów TC autorzy uwzględniają również koszty obsługi zamówień. Celem pracy jest wyznaczenie optymalnej wartości S_p dla całego horyzontu planowania, dla której funkcja całkowitych kosztów TC osiąga najmniejszą wartość. Autorzy opracowują optymalną politykę realizacji zamówień dla przypadku, gdy $T_{odz} = 1$. Dla $T_{odz} > 1$ wyznaczają rozwiązanie przybliżone [9].

Zbliżony model do Cohena tworzą Peter Kelle oraz Edward A. Silver. Autorzy opracowują optymalną politykę zakupu nowych produktów na przykładzie opakowań wielokrotnego użytku. Kelle i Silver analizują zapotrzebowanie netto $D_{nett,T}$, które w okresie T jest równe różnicy rzeczywistego zapotrzebowania D_T oraz liczby zwróconych opakowań Z_T . Zapotrzebowanie oraz zwroty są niezależnymi wielkościami losowymi. Wszystkie zwrócone produkty są poddawane procesom odzysku. Autorzy nie uwzględniają unieszkodliwiania zwrotów. Niezrealizowane zapotrzebowanie przyjmuje postać zleceń oczekujących i jest zaspokajane w kolejnych okresach. Autorzy nie uwzględniają kosztów związanych z obsługą zleceń oczekujących. Zastępują je wymaganym poziomem obsługi klienta, który dla okresu T jest równy $(1 - \varepsilon_T)$. Autorzy dążą do zminimalizowania łącznych kosztów zakupu nowych opakowań oraz składowania zwrotów, przy uwzględnieniu wymaganego poziomu obsługi. Horyzont planowania obejmuje H okresów. Celem pracy jest wyznaczenie optymalnej wielkości zamówienia $Q_{zam,T}$, gdzie $T = i+1, i+2, \dots, i+H$ a i określa bieżący okres. Funkcja łącznych kosztów przyjmuje następującą postać:

$$TC = \sum_{T=i+1}^{i+H} \left[k_{zam,T} \cdot Q_{zam,T} + K_{zam,T} \cdot \sigma(Q_{zam,T}) + k_{sknp} \cdot E(I_{np}) \right] \rightarrow \min, \quad (1.102)$$

gdzie:

$\sigma(Q_{zam,T}) = 0$ jeżeli $Q_{zam,T} = 0$ lub $\sigma(Q_{zam,T}) = 1$ jeżeli $Q_{zam,T} > 0$,

$I_{np,T} = \max \{I_{nett,T}, 0\}$ - zapas dostępny w magazynie na koniec okresu T ,

$I_{nett,T}$ - zapas netto na koniec okresu będący wynikiem różnicy zapasu dostępnego w magazynie i zleceń oczekujących.

Zależność pomiędzy wielkością zapasu netto w kolejnych okresach wyrażono następującym równaniem:

$$I_{nett,T} = I_{nett,T-1} + Q_{zam,T} - D_{nett,T}, \quad (1.103)$$

gdzie:

$$Q_{zam,T} \geq 0.$$

Autorzy zakładają, że prawdopodobieństwo pokrycia zapotrzebowania tym co znajduje się w magazynie jest przynajmniej równe $(1 - \varepsilon_T)$. Wyraża się to następującym wzorem:

$$P(I_{nett,T} \geq 0) \geq 1 - \varepsilon_T. \quad (1.104)$$

Kelle i Silver stwierdzają, że dla poziomu obsługi stosowanego w praktyce, który utrzymuje się na poziomie od 0,9 do 0,95, zapas netto jest wystarczającym przybliżeniem rzeczywistej wielkości zapasu. Autorzy sprowadzają opisany powyżej model stochastyczny do modelu deterministycznego. Analitycznie rozwiązywany jest tylko model deterministyczny. Autorzy zauważają, że jest to klasyczny problem ustalania wielkości partii produkcyjnej w deterministycznym modelu ze zmiennym zapotrzebowaniem dla poszczególnych okresów [64].

System zarządzania zapasami opakowań wielokrotnego użytku opisują również D. J. Buchanan oraz P. L. Abad. Autorzy tworzą model zbliżony do modelu Kelle'a i Silvera. Buchanan i Abad analizują model jedno- oraz wielookresowy. W modelu wielookresowym autorzy zakładają, że liczba zwrotów Z_T w okresie T jest frakcją $a_{z,T}$ wszystkich produktów $A_{z,T}$ znajdujących się na rynku na początku okresu T . $a_{z,T}$ jest zmienną losową z funkcją gęstości prawdopodobieństwa $f_{z,T}(a_{z,T})$. W każdym okresie pewna część produktów znajdujących się na rynku $(1 - \delta)$ nie nadaje się do ponownego wykorzystania. Autorzy uwzględniają koszt k_{khp} związany z produktami niesprzedanymi na koniec analizowanego horyzontu planowania. Zapotrzebowanie na nowe opakowania D_T jest zmienną losową z funkcją gęstości $f_{D,T}(D_T)$ i dystrybuantą $F_{D,T}(D_T)$. Autorzy dążą do zminimalizowania łącznych kosztów w analizowanym horyzoncie planowania. Wyznaczają optymalną wartość

Q_{zam} . Do rozwiązania modelu wykorzystują programowanie dynamiczne. Zakładają, że czas przebywania produktu na rynku jest opisany rozkładem wykładniczym [6].

Zaprezentowane wcześniej modele opierają się na założeniach klasycznego modelu przeglądu okresowego. Kolejni autorzy R. H. Teunter oraz D. Vlachos opracowują model będący modyfikacją tego systemu. Autorzy opracowują model symulacyjny zbliżony do modelu przeglądu ciągłego, który został opracowany wcześniej przez Ervina Van der Laana oraz Marca Salomona. Autorzy analizują system w ograniczonym horyzoncie planowania obejmującym H jednostek czasu. Przegląd zapasów jest realizowany w każdym okresie. Autorzy zakładają jednakowy czas realizacji procesu odzysku i produkcji T_{op} , który jest wielokrotnością przyjętej jednostki czasu.

$$T_{odz} = T_{prod} = T_{op}. \quad (1.105)$$

Zarówno zlecenie odzysku, jak i produkcji jest uruchamiane na początku okresu. Autorzy dopuszczają możliwość unieszkodliwienia zwrotów. Proces unieszkodliwienia jest również realizowany na początku okresu. Zapotrzebowanie zgłaszane w każdej jednostce czasu jest niezależną zmienną losową. Autorzy modelują wielkość zapotrzebowania wykorzystując rozkład Poissona oraz rozkład normalny. Dopuszczają możliwość powstania zleceń oczekujących. Analogicznie opisywane są zwroty. Autorzy zakładają, że w pierwszym okresie magazyn zwrotów i magazyn wyrobów finalnych są puste i nie ma żadnych zleceń będących w trakcie realizacji. W pierwszym okresie może być uruchomiona tylko produkcja. Autorzy uwzględniają stałe i zmienne koszty procesu produkcji i odzysku oraz zmienne koszty procesu unieszkodliwiania. Autorzy zakładają takie same koszty składowania dóbr znajdujących się w magazynie zwrotów oraz wyrobów finalnych. Uwzględniają również współczynnik dyskontowania χ dla kosztów w analizowanym horyzoncie planowania. Autorzy zakładają stałe wielkości partii odzysku Q_{odz} i produkcji Q_{prod} . Zastosowana polityka utrzymania zapasów opiera się na tym samym punkcie zamawiania dla odzysku oraz produkcji. Według tej polityki nowa partia jest produkowana bądź odzyskiwana jeżeli wielkość dysponowanego zapasu na początku okresu jest mniejsza, bądź równa s sztuk. Partia odzysku jest uruchamiana, jeżeli w magazynie zwrotów znajduje się co najmniej Q_{odz} sztuk zwrotów. W przeciwnym razie jest to sygnał do uruchomienia procesu produkcji. Proces unieszkodliwiania jest uruchamiany, jeżeli na początku okresu po ewentualnej decyzji o uruchomieniu odzysku w magazynie zwrotów znajduje się co najmniej s_u sztuk zwrotów.

Unieszkodliwiana jest nadwyżka zwrotów. Teunter oraz Vlachos analizują model wykorzystując symulację komputerową [148].

Na uwagę zasługuje również praca [56], której autorem jest Inderfurth. Autor opracował model, w którym produkty procesu odzysku różnią się od nowych wyrobów i są składowane w osobnych magazynach. Autor stosuje system odnawiania zapasów oparty na maksymalnym poziomie zapasów. Zapotrzebowanie na wyroby finalne oraz zapotrzebowanie na produkty procesu odzysku są niezależnymi zmiennymi losowymi. Interesujące jest założenie, które umożliwia wykorzystanie nadmiaru zapasu wyrobów finalnych do pokrycia niezrealizowanego zapotrzebowania na produkty procesu odzysku. Autor analizuje opracowany model na przykładzie jednego okresu.

Model systemu odnawiania zapasów opartego na maksymalnym poziomie został przedstawiony również w pracy [138]. Autorzy opracowali symulacyjny model planowania produkcji dla różnych lokalizacji wewnątrz sieci logistycznej.

Kolejną pracą, w której proces zarządzania zapasami jest analizowany dla pojedynczego okresu jest [159]. Na początku okresu ustalany jest poziom zapasu, który będzie wykorzystywany na pokrycie zapotrzebowania w całym okresie. Znana jest funkcja określająca skumulowaną wielkość zapotrzebowania na nowe wyroby. Część sprzedanych produktów zostaje zwróconych w trakcie analizowanego okresu i może zostać ponownie wykorzystana. Autorzy dążą do wyznaczenia optymalnej wartości początkowego poziomu zapasów.

Model przedstawiony w [159] został rozwinięty w pracy [94]. Autorzy zauważają, że z powodu braku historycznych danych, nie jest możliwe ustalenie dokładnego kształtu krzywej opisującej skumulowaną wielkość zapotrzebowania. Zakładają, że w analizowanym okresie jest znana tylko wartość średnia oraz wariancja wielkości zapotrzebowania na wyrób finalny.

Problem wyznaczenia optymalnej wartości początkowego poziomu zapasów dla produktów o krótkim cyklu życia został również opisany w pracy [4]. Autorzy opracowują model systemu, w którym producent, w każdym okresie wprowadza na eksploatacji obiekty nowej generacji. Produkty, które zostały zwrócone lub niesprzedane mogą zostać wykorzystane w następnym okresie. Autorzy zakładają, że produkty mogą zostać ponownie wykorzystane przez ograniczoną liczbę cykli.

Model zarządzania zapasami produktów o krótkim cyklu życia został przedstawiony również w pracy [150]. Autorzy opracowali model procesu przetwarzania jednorazowych aparatów fotograficznych oparty na sieci kolejkowej. Zapotrzebowanie na nowe wyroby jest opisane rozkładem Poissona. Niezrealizowane zapotrzebowanie jest tracone. Sprzedany

aparatus jest zwracany z określonym prawdopodobieństwem. Zwrócone produkty są poddawane przetwarzaniu. Liczba obiektów krążących w sieci jest stała.

W grupie modeli opartych na okresowym przeglądzie zapasów na uwagę zasługuje również praca [164], która została opublikowana 1967 r. Model, który został przedstawiony w tej pracy opisuje system zarządzania zapasami w przedsiębiorstwie, które wypożycza sprzęt techniczny dla swoich pracowników. Pracownicy użytkują sprzęt przez określony czas, a po okresie użytkowania sprzęt techniczny jest zwracany i może zostać ponownie wykorzystany. W każdym z okresów przedsiębiorstwo podejmuje decyzję o tym czy zwiększyć, czy zmniejszyć liczbę wypożyczonego sprzętu technicznego.

Na szczególne zainteresowanie zasługuje praca [70], w której autorzy prezentują model oparty na założeniu, że liczba obiektów wycofanych z eksploatacji jest zależna od wielkości zapotrzebowania na nowe produkty. Zapotrzebowanie na nowe produkty jest opisane rozkładem Poissona. Autorzy zakładają stałe wartości prawdopodobieństw, że obiekt zostanie zwrócony po okresie użytkowania oraz że będzie możliwe jego ponowne wykorzystanie.

Modele opisane powyżej zakładają jedną możliwość wykorzystania obiektów wycofanych z eksploatacji. Możliwość różnych sposobów zagospodarowania obiektów w systemach opartych na okresowym przeglądzie zapasów została opisana w pracy [53].

1.2. Podsumowanie literatury

Przedstawiony przegląd literatury obejmujący swoim zakresem zagadnienia modelowania procesów logistycznych, w obszarze zagospodarowania zwrotów, pozwala na podsumowanie istniejącego stanu wiedzy.

Zdecydowanie najlepiej rozwinięty obszar badań w logistyce zwrotów stanowi grupa modeli opisujących proces utrzymania zapasów w systemach obsługi. W pozostałych obszarach możliwe jest wskazanie następujących braków:

1. Niedostatecznie dużo uwagi poświęcono metodom prognozowania liczby obiektów zwracanych do systemu odzysku. Większość prac opiera się na założeniu o Poissonowskim charakterze rozkładu prawdopodobieństwa opisującego liczbę obiektów zwracanych do systemu odzysku. Nieliczne prace badają zależność pomiędzy wielkością występującego zapotrzebowania, a liczbą zwrotów. Większość prac zakłada ich całkowitą niezależność.
2. Brak jest modeli zarządzania zapasami uwzględniających możliwość dostarczania zwrotów w partiach.

3. Nieliczne modele wykorzystują teorię niezawodności do oceny możliwości ponownego wykorzystania komponentów wchodzących w skład zwróconych obiektów technicznych.
4. Niewystarczające uwzględnienie różnych możliwości odzysku wartości ze zwróconych produktów. Brak modeli uwzględniających jednocześnie więcej niż trzy ze zdefiniowanych rodzajów odzysku.
5. Brak modeli wspierających proces podejmowania decyzji o wyborze rodzaju odzysku.
6. Niedostatecznie dużo uwagi poświęcono zagadnieniu wpływu chwili wycofania produktu z eksploatacji na proces zagospodarowania zwrotów. W miarę trwania procesu eksploatacji w obiektach zachodzą procesy starzenia. Ten aspekt może mieć istotny wpływ na możliwość ponownego wykorzystania tych produktów lub ich elementów składowych.
7. Bardzo słabo został rozwinięty obszar logistyki zwrotów związany z procesem zbiórki obiektów.
8. Brak prac dostarczających informacji o wpływie zawodności poszczególnych procesów logistycznych na liczbę obiektów zwracanych do systemu odzysku.
9. Brak prac wspierających proces wyboru odpowiedniej polityki utrzymania zapasów.
10. Niedostatecznie dużo uwagi poświęcono modelom uwzględniającym wiele niezależnych źródeł zwrotów.
11. Nieliczne modele uwzględniają koszty transportu zwrotów.

2. CEL I ZAKRES PRACY

W dostępnej literaturze modele prognozowania liczby obiektów zwracanych do systemu odzysku nie uwzględniają wielu przyczyn wycofywania obiektów z eksploatacji. W rzeczywistych systemach produkty, które uszkodzą się w krótkim czasie od zakupu przez finalnego odbiorcę, są wycofywane z eksploatacji i wysyłane do producenta. Realizacja procesów odzysku takich produktów nie wymaga dużych nakładów pracy, ponieważ nieuszkodzone części składowe nie zostały narażone na procesy starzenia i nadają się do bezpośredniego ponownego wykorzystania. W dostępnej literaturze brak jest modeli utrzymania zapasów uwzględniających teorię niezawodności w procesie prognozowania liczby zwrotów. Powyższe spostrzeżenia pozwoliły na sformułowanie celu pracy:

Opracowanie modelu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Model ma uwzględniać obiekty wycofane przed upływem określonego czasu, od chwili rozpoczęcia procesu eksploatacji. Model ma uwzględniać również zależność pomiędzy wielkością zapotrzebowania na nowe obiekty, a liczbą obiektów wycofanych z eksploatacji.

Cel rozprawy doktorskiej obejmuje realizację następujących zadań cząstkowych:

- sformułowanie podstawowych definicji związanych z opracowanym modelem wsparcia logistycznego;
- przyjęcie założeń teoretycznych opisujących modelowany system;
- opracowanie modelu prognostycznego;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu prognostycznego;
- opracowanie analitycznego modelu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu analitycznego na zmianę wartości podstawowych parametrów wejściowych modelu;
- opracowanie modelu symulacyjnego;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu symulacyjnego na zmianę wartości podstawowych parametrów wejściowych modelu;
- weryfikację modelu symulacyjnego;
- podsumowanie oraz wnioski.

3. MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO PROCESU ZAGOSPODAROWANIA OBIEKTÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI

Kierując się definicją systemu wsparcia logistycznego przedstawioną w pracach [101, 163] system logistyczny wspierający proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji można zdefiniować, jako: *celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający proces podstawowy (zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji) poprzez integrację wszystkich działań, związanych z efektywnym i korzystnym przepływem niezbędnych zasobów rzeczowych i informacyjnych oraz wspierający proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji, w zakresie zapewnienia koniecznego dla tego procesu zaplecza logistycznego.*

Pojęcie zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji jest związane ze zbiórką, transportem, składowaniem oraz realizacją procesów odzysku lub unieszkodliwienia obiektów, które zostały wycofane z procesu eksploatacji.

Na potrzeby pracy przyjęto następującą definicję obiektu wycofanego z eksploatacji: *Obiekt wycofany z eksploatacji to obiekt, co do którego podjęto decyzję o jego unieszkodliwieniu lub możliwości wypełniania wymaganych funkcji po realizacji procesów odzysku.*

Pod pojęciem procesu odzysku wartości rozumie się *wszelkie działania, niestwarzające zagrożenia dla życia, zdrowia ludzi lub dla środowiska, polegające na wykorzystaniu obiektów w całości lub w części, lub prowadzące do odzyskania z obiektów substancji, materiałów lub energii [151].*

W modelowanym systemie zapotrzebowanie na nowe obiekty D_T jest zgłaszane okresowo przez system eksploatacji i może zostać pokryte przez produkcję nowych wyrobów lub odzysk obiektów wycofanych z eksploatacji. Zapotrzebowanie jest zawsze zgłaszane na początku okresu. Zgłoszenie zapotrzebowania na nowy obiekt nie jest następstwem uszkodzenia obiektu znajdującego się w systemie eksploatacji. W modelowanym systemie zakłada się, że obiekt opuszcza system eksploatacji i jest zwracany do systemu odzysku, jeżeli ulegnie uszkodzeniu i czas, który upłynął od wprowadzenia go do systemu eksploatacji do chwili powstania uszkodzenia jest mniejszy niż τ_{dop} . Obiekty uszkodzone w późniejszym okresie nie są zwracane do systemu odzysku. Zmienna τ_{dop} jest wyrażona w liczbie okresów. W dalszej części pracy parametr τ_{dop} będzie określany jako dopuszczalny czas do

uszkodzenia. W modelowanym systemie zakłada się, że wszystkie obiekty wycofane z eksploatacji przed upływem τ_{dop} mogą zostać ponownie wykorzystane. Uszkodzone obiekty są zbierane i transportowane do systemu odzysku. W modelu nie uwzględnia się kosztów związanych z procesem zbiórki oraz transportu. Zwroty są dostarczane do systemu odzysku na początku okresu. W każdym okresie do systemu jest zwracana następująca liczba obiektów:

$$Z_T = PN_{[t_{T-1}, t_T]}, \quad (3.1)$$

gdzie:

$PN_{[t_{T-1}, t_T]}$ - liczba obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale czasu $[t_{T-1}, t_T)$,

t_{T-1} - chwila wyznaczająca początek okresu $T-1$,

t_T - chwila wyznaczająca początek okresu T .

W systemie funkcjonują dwa magazyny: magazyn obiektów wycofanych z eksploatacji oraz magazyn wyrobów finalnych. Wielkość zapasu znajdującego się w poszczególnych magazynach jest korygowana przez uruchomienie procesu odzysku, unieszkodliwiania lub produkcji, co T_{prz} okresów. Przy założeniu, że pierwszy przegląd zapasu jest realizowany w okresie $T=1$, zbiór okresów $V_{T_{prz}}$, w których będą realizowane kolejne przeglądy, można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$V_{T_{prz}} = \{T_{prz,1}, T_{prz,2}, T_{prz,3}, \dots, T_{prz,n}, \dots\}, \quad (3.2)$$

gdzie:

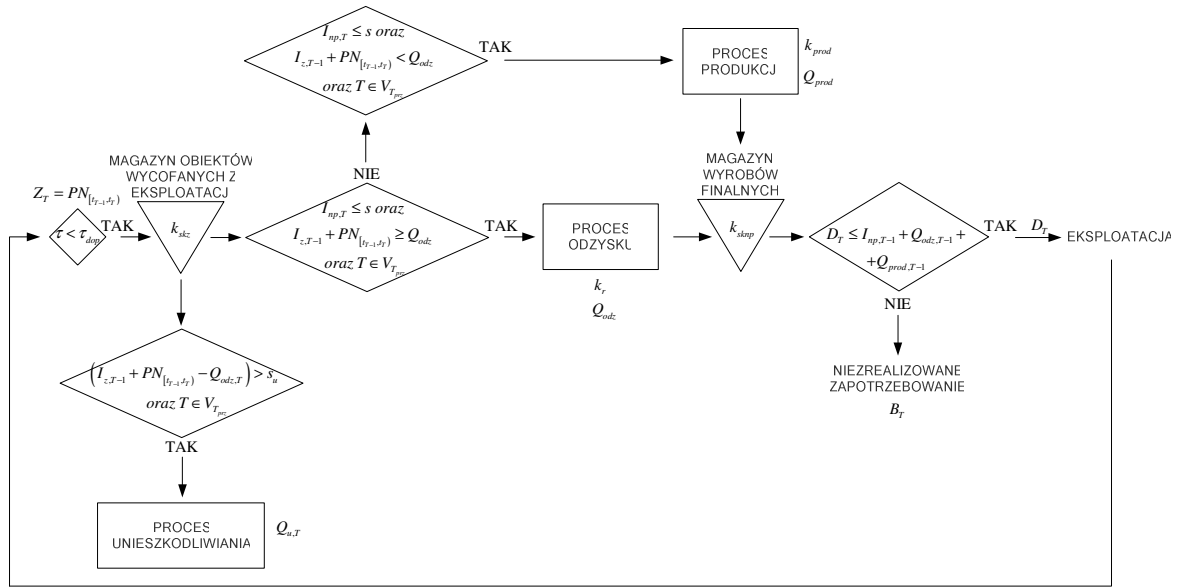
$$T_{prz,n} = 1 + (n-1) \cdot T_{prz} \quad \text{oraz} \quad T_{prz,n} \leq H \quad \text{dla} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.3)$$

gdzie:

n - numer kolejnego przeglądu,

H - horyzont planowania.

Proces odzysku jest uruchamiany, jeżeli dostępny zapas w magazynie wyrobów finalnych spadnie do poziomu s sztuk i w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji znajduje się wystarczająca ilość obiektów potrzebna do zrealizowania partii odzysku. W przeciwnym razie uruchamiany jest proces produkcji. Produkty procesu odzysku i produkcji mogą zostać wykorzystane dopiero na początku następnego okresu. Proces unieszkodliwiania jest uruchamiany w okresie przeglądu, jeżeli w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji znajduje się więcej niż s_u obiektów. Unieszkodliwiany jest nadmiar zapasu. Proces unieszkodliwiania jest uruchamiany po podjęciu decyzji o realizacji procesu odzysku. Uproszczony schemat modelu przedstawia rysunek 3.1.



Rys. 3.1. Schemat modelu systemu wsparcia logistycznego

Źródło: Opracowanie własne

Poziom zapasu obiektów znajdujących się w magazynie wyrobów finalnych w okresie T może zostać przedstawiony w następujący sposób:

$$I_{np,T} = \max \{ I_{np,T-1} + Q_{odz,T-1} + Q_{prod,T-1} - D_T, 0 \}, \quad (3.4)$$

gdzie:

$I_{np,T-1}$ - wielkość zapasu w magazynie wyrobów finalnych na koniec okresu poprzedzającego okres T ,

$Q_{odz,T-1}$ - wielkość partii odzysku realizowanej w okresie $T-1$,

$Q_{prod,T-1}$ - wielkość partii produkcyjnej realizowanej w okresie $T-1$,

D_T - wielkość zapotrzebowania na nowe obiekty w okresie T .

W opisywanym modelu nie dopuszcza się zleceń oczekujących. Jeżeli:

$$D_T > I_{np,T-1} + Q_{odz,T-1} + Q_{prod,T-1}, \quad (3.5)$$

do systemu eksploatacji wprowadzane są wszystkie obiekty znajdujące się w magazynie, a:

$$I_{np,T} = 0.$$

Wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania w okresie T można przedstawić następującym wzorem:

$$B_T = \left| \min \{ I_{np,T-1} + Q_{odz,T-1} + Q_{prod,T-1} - D_T, 0 \} \right|. \quad (3.6)$$

W analizowanym modelu nie uwzględnia się możliwości unieszkodliwienia obiektów, które znalazły się w magazynie wyrobów finalnych.

Wielkość zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji w okresie T można przedstawić w następujący sposób:

$$I_{z,T} = I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T} - Q_{u,T}, \quad (3.7)$$

gdzie:

$I_{z,T-1}$ - wielkość zapasu w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji na koniec poprzedniego okresu,

$PN_{[t_{T-1}, t_T]}$ - oczekiwana liczba obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale czasu $[t_{T-1}, t_T)$,

$Q_{odz,T}$ - wielkość partii odzysku realizowanej w okresie T .

$Q_{u,T}$ - wielkość partii w procesie unieszkodliwiania realizowanej w okresie T .

Wielkość partii odzysku w okresie T można opisać poniższym wzorem:

$$Q_{odz,T} = Q_{odz} \cdot X_T, \quad (3.8)$$

gdzie:

$$X_T = \begin{cases} 1 & \text{gdy } I_{np,T} \leq s \text{ oraz } I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} \geq Q_{odz} \text{ oraz } T \in V_{T_{prz}} \\ 0 & \text{gdy } I_{np,T} > s \text{ lub } (I_{np,T} \leq s \text{ oraz } I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} < Q_{odz}) \text{ lub } T \notin V_{T_{prz}} \end{cases}. \quad (3.9)$$

Analogicznie można wyznaczyć wielkość partii produkcyjnej w okresie T :

$$Q_{prod,T} = Q_{prod} \cdot Y_T, \quad (3.10)$$

gdzie:

$$Y_T = \begin{cases} 1 & \text{gdy } I_{np,T} \leq s \text{ oraz } I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} < Q_{odz} \text{ oraz } T \in V_{T_{prz}} \\ 0 & \text{gdy } I_{np,T} > s \text{ lub } (I_{np,T} \leq s \text{ oraz } I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} \geq Q_{odz}) \text{ lub } T \notin V_{T_{prz}} \end{cases}. \quad (3.11)$$

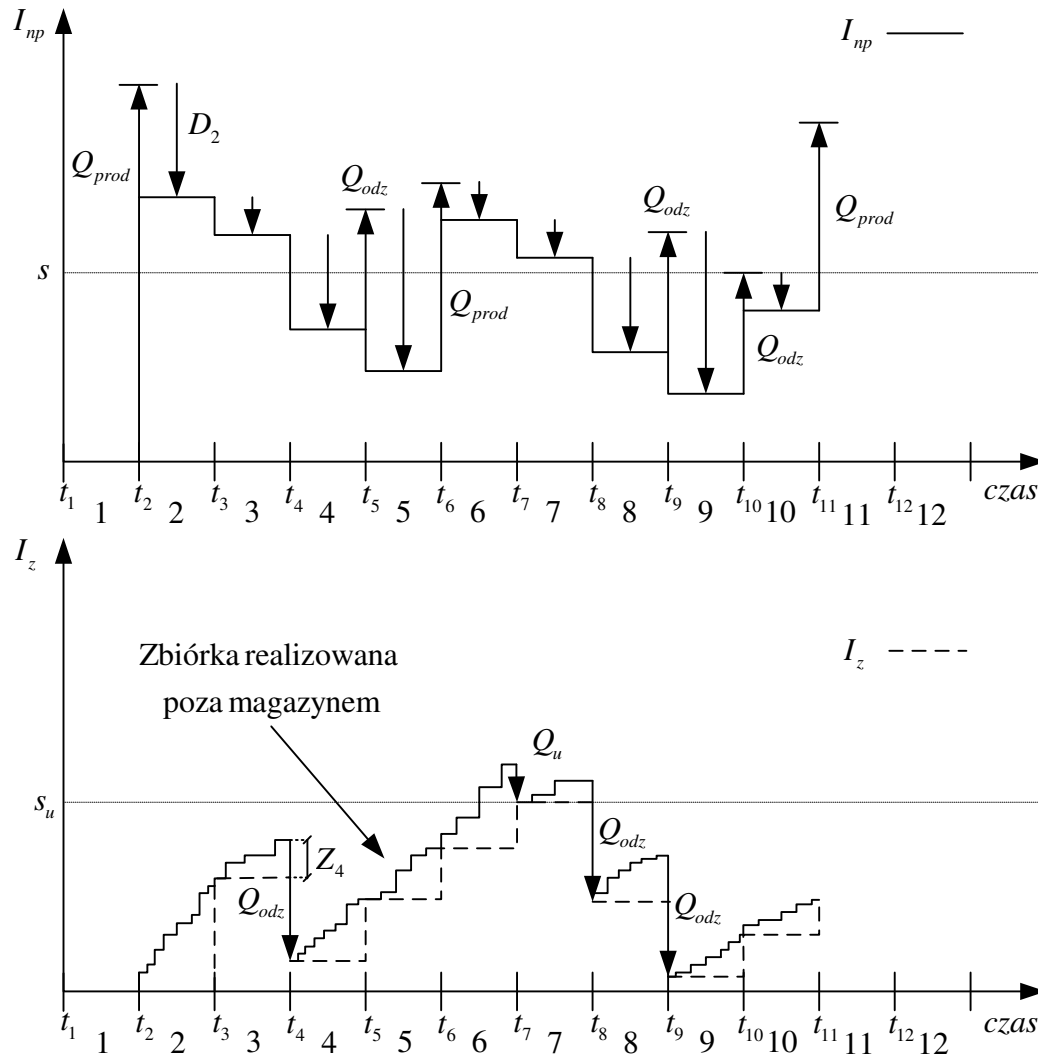
Wielkość partii w procesie unieszkodliwiania w okresie T wyznaczana jest w następujący sposób:

$$Q_{u,T} = (I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T} - s_u) \cdot U_T, \quad (3.12)$$

gdzie:

$$U_T = \begin{cases} 1 & \text{gdy } (I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T}) > s_u \text{ oraz } T \in V_{T_{prz}} \\ 0 & \text{gdy } (I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T}) \leq s_u \text{ lub } T \notin V_{T_{prz}} \end{cases}. \quad (3.13)$$

Przykładowy schemat procesu zarządzania zapasami w modelowanym systemie przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Schemat procesu zarządzania zapasami w modelowanym systemie dla $T_{prz} = 1$

Źródło: Opracowanie własne

3.1. Metoda prognozowania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji

Zaprezentowany model systemu wsparcia logistycznego wymaga opracowania metody prognozowania liczby obiektów wycofywanych z eksploatacji, w określonym przedziale czasu, przy ustalonej wartości dopuszczalnego czasu do uszkodzenia. Opracowany model prognostyczny jest rozwinięciem modelu Murayamy przedstawionego w pierwszym rozdziale i dokładnie opisanego w pracach [97, 98, 99, 100].

W modelowanym systemie zakłada się, że obiekt opuszcza system eksploatacji i jest zwracany do systemu odzysku, jeżeli ulegnie uszkodzeniu i czas, który upłynął od wprowadzenia go do systemu eksploatacji do chwili powstania uszkodzenia jest mniejszy niż τ_{dop} .

Wartość zmiennej τ_{dop} jest uzależniona od:

- chwili rozpoczęcia się procesów starzenia obiektu,
- kosztów obsługi systemu odzysku.

W związku z tym, to czy obiekt techniczny w chwili t znajduje się w systemie odzysku zależy od:

- zmiennych losowych określających liczbę obiektów wprowadzonych do systemu eksploatacji w chwili t_e ,
- struktury niezawodnościowej obiektu technicznego,
- zmiennej losowej określającej prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu technicznego do chwili τ_{dop} od wprowadzenia do systemu eksploatacji.

Celem opracowanej metody jest wyznaczenie prognozy liczby obiektów opuszczających system eksploatacji i wchodzących do systemu odzysku w przedziale czasu $[t_a, t_b)$, przy znanej liczbie obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji w chwili t_e .

Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji $PN_{[t_a, t_b)}$ jest wyznaczana dla określonego przedziału czasu:

$$[t_a, t_b) \text{ dla } t_a, t_b \in N. \quad (3.14)$$

Prawdopodobieństwo opuszczenia systemu eksploatacji przez obiekt w przedziale czasu od x_1 do x_2 może zostać zapisane w następujący sposób [90]:

$$F(x_1, x_2) = P(x_1 \leq \tau < x_2), \quad (3.15)$$

gdzie:

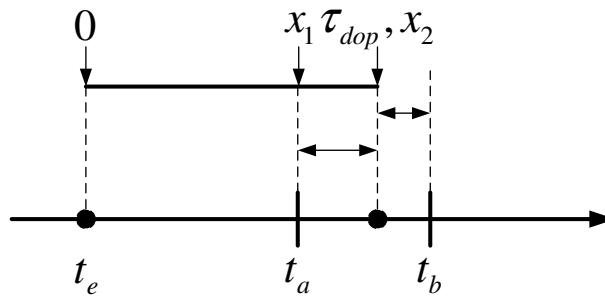
τ - zmienna losowa określająca czas do uszkodzenia obiektu.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono metodę wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale czasu $[t_a, t_b)$. Liczbę obiektów wprowadzanych do eksploatacji w jednostce czasu opisano funkcją ciągłą oraz funkcją dyskretną. Założenia przedstawionego modelu prognostycznego zostały opublikowane w pracy [112].

3.1.1. Liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji opisana funkcją ciągłą

Dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ liczba obiektów $PN_{[t_a, t_b]}$, które znajdują się w systemie odzysku w przedziale czasu $[t_a, t_b)$, jest sumą liczby zwrotów z trzech faz. Dwie pierwsze związane są z obiektami, dla których $t_e \leq t_a$. W ostatniej analizowane są obiekty, które zasiliły system eksploatacji już w przedziale $[t_a, t_b)$. W pierwszej fazie (rys. 3.3): $x_1 = t_a - t_e$ a $x_2 = \tau_{dop} \cdot t_e$ może przyjmować wartości z zakresu od $\max(t_a - \tau_{dop}, 0)$ do $t_b - \tau_{dop}$. Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{1,[t_a, t_b]} = \int_{\max(t_a - \tau_{dop}, 0)}^{t_b - \tau_{dop}} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop}) dt_e. \quad (3.16)$$

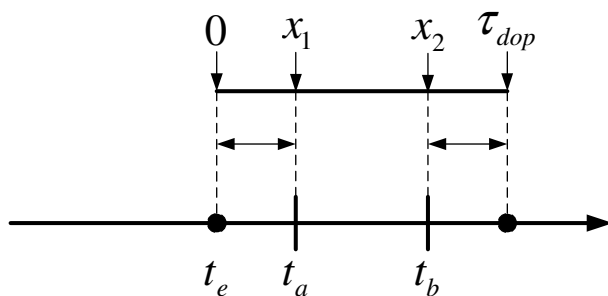


Rys. 3.3. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza I, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

W drugiej fazie (rys. 3.4): $x_1 = t_a - t_e$ oraz $x_2 = t_b - t_e$. t_e może przyjmować wartości z zakresu od $t_b - \tau_{dop}$ do t_a . Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{2,[t_a, t_b]} = \int_{t_b - \tau_{dop}}^{t_a} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.17)$$

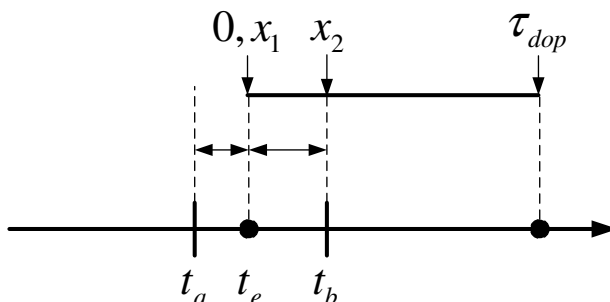


Rys. 3.4. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza II, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

W trzeciej fazie (rys. 3.5): $x_1 = 0$ oraz $x_2 = t_b - t_e$. t_e może przyjmować wartości z zakresu od t_a do t_b . Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{3,[t_a, t_b)} = \int_{t_a}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.18)$$



Rys. 3.5. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza III, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, jeżeli $t_b - \tau_{dop} > 0$,

$$PN_{[t_a, t_b)} = PN_{1,[t_a, t_b)} + PN_{2,[t_a, t_b)} + PN_{3,[t_a, t_b)}, \quad (3.19)$$

gdzie:

$$PN_{1,[t_a, t_b)} = \int_{\max(t_a - \tau_{dop}, 0)}^{t_b - \tau_{dop}} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop}) dt_e, \quad (3.20)$$

$$PN_{2,[t_a, t_b)} = \int_{t_b - \tau_{dop}}^{t_a} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e) dt_e, \quad (3.21)$$

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \int_{t_a}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.22)$$

Jeżeli $t_b - \tau_{dop} \leq 0$ oraz $t_a > 0$,

$$PN_{[t_a,t_b]} = PN_{2,[t_a,t_b]} + PN_{3,[t_a,t_b]}, \quad (3.23)$$

gdzie:

$$PN_{2,[t_a,t_b]} = \int_0^{t_a} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e) dt_e, \quad (3.24)$$

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \int_{t_a}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.25)$$

Jeżeli $t_b - \tau_{dop} \leq 0$ oraz początek analizowanego okresu pokrywa się z chwilą wprowadzenia do systemu eksploatacji pierwszego obiektu, tzn. $t_a = 0$, to liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku, będzie następująca:

$$PN_{[t_a,t_b]} = PN_{3,[t_a,t_b]}, \quad (3.26)$$

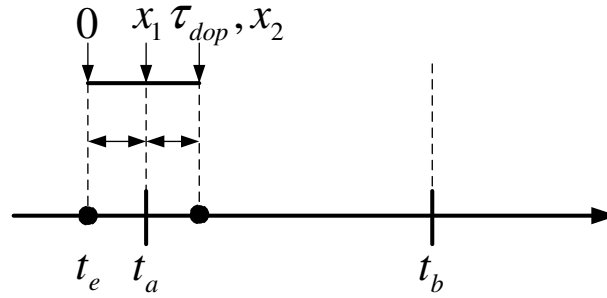
gdzie:

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \int_0^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.27)$$

Analogicznie wyznaczana jest liczba obiektów $PN_{[t_a,t_b]}$, które znajdują się w systemie odzysku w przedziale czasu $[t_a, t_b)$, dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$. Ponownie jest to suma trzech faz. Różnica polega na tym, że obiekty, dla których $t_e \leq t_a$ są uwzględniane tylko przy wyznaczaniu $PN_{1,[t_a,t_b]}$. W pozostałych dwóch fazach analizowane są obiekty, które zasiliły system eksploatacji już w przedziale $[t_a, t_b)$.

W pierwszej fazie (rys. 3.6): $x_1 = t_a - t_e$ a $x_2 = \tau_{dop}$. Zmienna t_e określająca chwilę wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji może przyjmować wartości z zakresu od $\max(t_a - \tau_{dop}, 0)$ do t_a . Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{1,[t_a,t_b]} = \int_{\max(t_a - \tau_{dop}, 0)}^{t_a} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop}) dt_e. \quad (3.28)$$

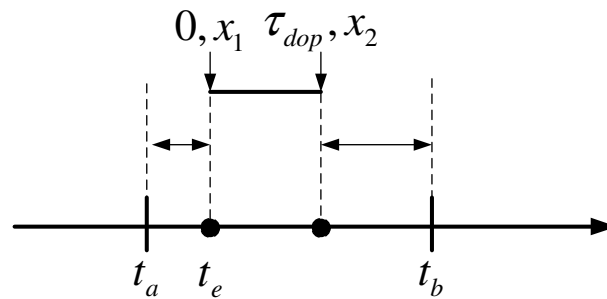


Rys. 3.6. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$ (faza I, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

W drugiej fazie (rys. 3.7): $x_1 = 0$ oraz $x_2 = \tau_{dop}$. Zmienna t_e określająca chwilę wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji może przyjmować wartości z zakresu od t_a do $t_b - \tau_{dop}$. Liczba obiektów, które znajdą się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{2,[t_a,t_b)} = \int_{t_a}^{t_b - \tau_{dop}} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, \tau_{dop}) dt_e. \quad (3.29)$$

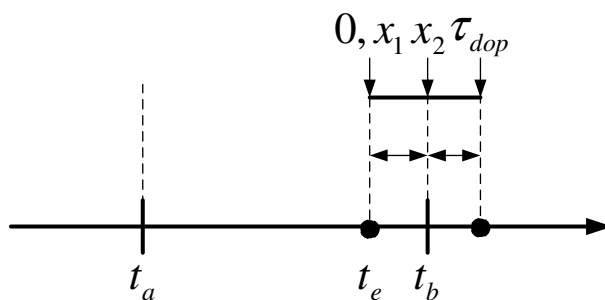


Rys. 3.7. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$ (faza II, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

W trzeciej fazie (rys. 3.8): $x_1 = 0$ oraz $x_2 = t_b - t_e$. Zmienna t_e określająca chwilę wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji może przyjmować wartości z zakresu od $t_b - \tau_{dop}$ do t_b . Liczba obiektów, które znajdą się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{3,[t_a,t_b)} = \int_{t_b - \tau_{dop}}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.30)$$



Rys. 3.8. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$ (faza III, funkcja ciągła)

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, jeżeli $t_a > 0$,

$$PN_{[t_a, t_b]} = PN_{1, [t_a, t_b]} + PN_{2, [t_a, t_b]} + PN_{3, [t_a, t_b]}, \quad (3.31)$$

gdzie:

$$PN_{1, [t_a, t_b]} = \int_{\max(t_a - \tau_{dop}, 0)}^{t_a} D_{zr}(t_e) \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop}) dt_e, \quad (3.32)$$

$$PN_{2, [t_a, t_b]} = \int_{t_a}^{t_b - \tau_{dop}} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, \tau_{dop}) dt_e, \quad (3.33)$$

$$PN_{3, [t_a, t_b]} = \int_{t_b - \tau_{dop}}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.34)$$

Jeżeli $t_a = 0$,

$$PN_{[t_a, t_b]} = PN_{2, [t_a, t_b]} + PN_{3, [t_a, t_b]}, \quad (3.35)$$

gdzie:

$$PN_{2, [t_a, t_b]} = \int_0^{t_b - \tau_{dop}} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, \tau_{dop}) dt_e, \quad (3.36)$$

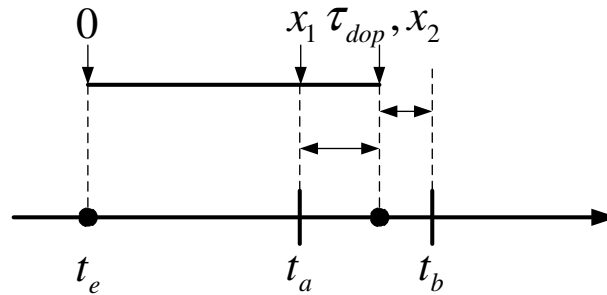
$$PN_{3, [t_a, t_b]} = \int_{t_b - t_1}^{t_b} D_{zr}(t_e) \cdot F(0, t_b - t_e) dt_e. \quad (3.37)$$

3.1.2. Liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji opisana funkcją dyskretną

Dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ liczba obiektów $PN_{[t_a, t_b]}$, które znajdą się w systemie odzysku w przedziale czasu $[t_a, t_b)$, jest sumą trzech faz. Dwie pierwsze związane są z obiektami, dla których $t_e \leq t_a$. W ostatniej analizowane są obiekty, które zasiliły system eksploatacji w

przedziale (t_a, t_b) . W pierwszej fazie (rys. 3.9): $x_1 = t_a - t_e$ a $x_2 = \tau_{dop}$. Zmienna t_e może przyjmować wartości z zakresu od $\max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)$ do $t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil$. Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{1, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = \max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil} (D_{zr, t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})). \quad (3.38)$$

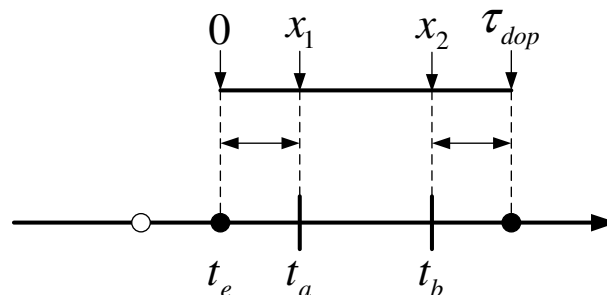


Rys. 3.9. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza I, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

W drugiej fazie (rys. 3.10): $x_1 = t_a - t_e$ oraz $x_2 = t_b - t_e$. Zmienna t_e może przyjmować wartości z zakresu od $t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil + 1$ do t_a . Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{2, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil + 1}^{t_a} (D_{zr, t_e} \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e)). \quad (3.39)$$

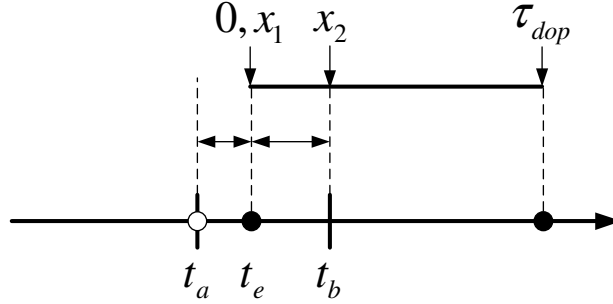


Rys. 3.10. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza II, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

W trzeciej fazie (rys. 3.11): $x_1 = 0$ oraz $x_2 = t_b - t_e$. Zmienna t_e może przyjmować wartości z zakresu od $t_a + 1$ do t_b . Liczba obiektów, które znajdą się w systemie odzysku może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.40)$$



Rys. 3.11. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (faza III, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, jeżeli $t_b - \tau_{dop} > 0$,

$$PN_{[t_a,t_b]} = PN_{1,[t_a,t_b]} + PN_{2,[t_a,t_b]} + PN_{3,[t_a,t_b]}, \quad (3.41)$$

gdzie:

$$PN_{1,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=\max(t_a-\lceil\tau_{dop}\rceil, 0)}^{t_b-\lceil\tau_{dop}\rceil} (D_{zr,t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})), \quad (3.42)$$

$$PN_{2,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_b-\lceil\tau_{dop}\rceil+1}^{t_a} (D_{zr,t_e} \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e)), \quad (3.43)$$

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.44)$$

Jeżeli $t_b - \tau_{dop} \leq 0$ oraz $t_a > 0$,

$$PN_{[t_a,t_b]} = PN_{2,[t_a,t_b]} + PN_{3,[t_a,t_b]}, \quad (3.45)$$

gdzie:

$$PN_{2,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=0}^{t_a} (D_{zr,t_e} \cdot F(t_a - t_e, t_b - t_e)), \quad (3.46)$$

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)), \quad (3.47)$$

jeżeli $t_b - \tau_{dop} \leq 0$ oraz $t_a = 0$,

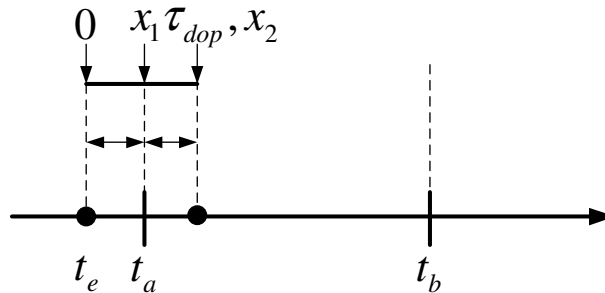
$$PN_{[t_a,t_b]} = PN_{3,[t_a,t_b]}, \quad (3.48)$$

gdzie:

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=0}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.49)$$

Podobnie wyznaczana jest liczba obiektów znajdujących się w systemie odzysku $PN_{[t_a,t_b]}$ dla $t_b - t_a > \lceil \tau_{dop} \rceil$. W fazie przedstawionej na rys. 3.12 $x_1 = t_a - t_e$ oraz $x_2 = \tau_{dop} \cdot t_e$ mogą przyjmować wartości z zakresu od $\max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)$ do t_a . Liczba obiektów, które znajdują się w systemie odzysku może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$PN_{1,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=\max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_a} (D_{zr,t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})). \quad (3.50)$$



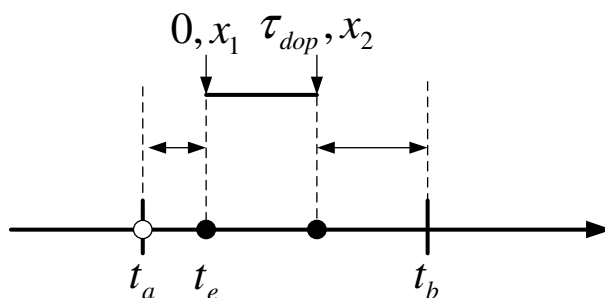
Rys. 3.12. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale

$[t_a, t_b]$ dla $t_b - t_a > \lceil \tau_{dop} \rceil$ (faza I, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

W kolejnym kroku (rys. 3.13) t_e przyjmuje wartości z zakresu od $t_a + 1$ do $t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil$. Natomiast $x_1 = 0$ a $x_2 = \tau_{dop}$. Przy takich warunkach liczba obiektów w systemie odzysku prognozowana jest w poniższy sposób:

$$PN_{2,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, \tau_{dop})). \quad (3.51)$$

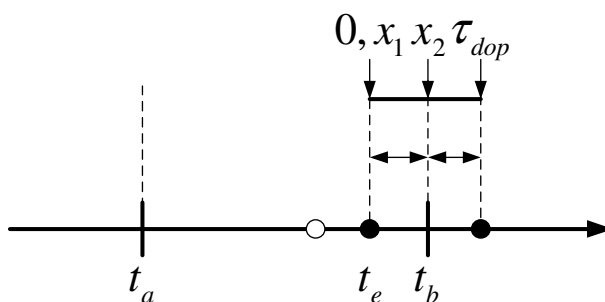


Rys. 3.13. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a > \lceil \tau_{dop} \rceil$ (faza II, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

W ostatnim kroku (rys. 3.14) t_e przyjmuje wartości z zakresu od $t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil + 1$ do t_b . Natomiast $x_1 = 0$ a $x_2 = t_b - t_e$. Przy takich warunkach liczba obiektów w systemie odzysku prognozowana jest w poniższy sposób:

$$PN_{3, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = t_b - \lceil \tau_{dop} \rceil + 1}^{t_b} (D_{zr, t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.52)$$



Rys. 3.14. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a > \lceil \tau_{dop} \rceil$ (faza III, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, jeżeli $t_b - t_a > \lceil \tau_{dop} \rceil$ oraz $t_a \geq 0$,

$$PN_{[t_a, t_b)} = PN_{1, [t_a, t_b)} + PN_{2, [t_a, t_b)} + PN_{3, [t_a, t_b)}, \quad (3.53)$$

gdzie:

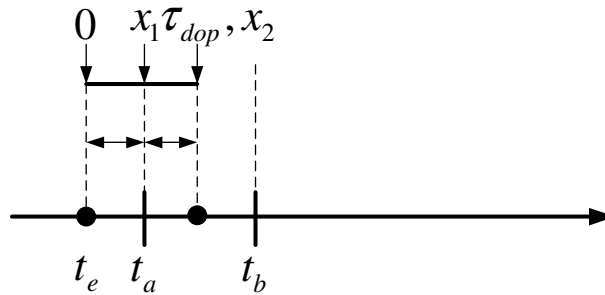
$$PN_{1, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = \max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_a} (D_{zr, t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})), \quad (3.54)$$

$$PN_{2,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b-\lceil \tau_{dop} \rceil} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, \tau_{dop})), \quad (3.55)$$

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_b-\lceil \tau_{dop} \rceil+1}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.56)$$

W sytuacji, w której wielkość zapotrzebowania jest opisana funkcją dyskretną konieczne jest osobne rozpatrzenie warunku: $t_b - t_a = \lceil \tau_{dop} \rceil$. Liczba obiektów znajdujących się w systemie odzysku może zostać przedstawiona, jako suma faz przedstawionych na rys. 3.15 oraz rys. 3.16. W pierwszym kroku (rys. 3.15) t_e przyjmuje wartości z zakresu od $\max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)$ do t_a . Natomiast $x_1 = t_a - t_e$ a $x_2 = \tau_{dop}$. Przy takich warunkach liczba obiektów w systemie odzysku prognozowana jest w poniższy sposób:

$$PN_{1,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=\max(t_a-\lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_a} (D_{zr,t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})). \quad (3.57)$$

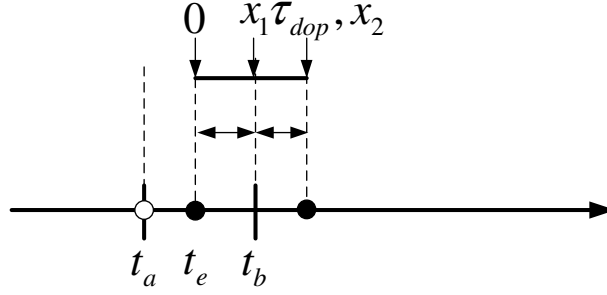


Rys. 3.15. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b]$ dla $t_b - t_a = \lceil \tau_{dop} \rceil$ (faza I, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

W kolejnym kroku (rys. 3.16) t_e przyjmuje wartości z zakresu od $t_a + 1$ do t_b . Dla takiego zakresu zmienności t_e , $x_1 = 0$ a $x_2 = t_b - t_e$. Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji w analizowanym przedziale czasu wyraża się w następujący sposób:

$$PN_{3,[t_a,t_b]} = \sum_{t_e=t_a+1}^{t_b} (D_{zr,t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.58)$$



Rys. 3.16. Schemat procesu wyznaczania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w przedziale $[t_a, t_b)$ dla $t_b - t_a = \lceil \tau_{dop} \rceil$ (faza III, funkcja dyskretna)

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, jeżeli $t_b - t_a = \lceil \tau_{dop} \rceil$ oraz $t_a \geq 0$,

$$PN_{[t_a, t_b)} = PN_{1, [t_a, t_b)} + PN_{3, [t_a, t_b)}, \quad (3.59)$$

gdzie:

$$PN_{1, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = \max(t_a - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_a} (D_{zr, t_e} \cdot F(t_a - t_e, \tau_{dop})), \quad (3.60)$$

$$PN_{3, [t_a, t_b)} = \sum_{t_e = t_a + 1}^{t_b} (D_{zr, t_e} \cdot F(0, t_b - t_e)). \quad (3.61)$$

3.2. Funkcja oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu

Łączne koszty funkcjonowania systemu w dowolnym okresie T z analizowanego horyzontu planowania można opisać wzorem:

$$TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \left(\begin{aligned} &TC_{skz, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) + TC_{sknp, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) + \\ &+ TC_{odz, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) + TC_{prod, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) + \\ &+ TC_{b, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) + TC_{u, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) \end{aligned} \right), \quad (3.62)$$

gdzie:

$TC_{skz, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów składowania obiektów wycofanych z eksploatacji w okresie T ,

$TC_{sknp, T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów składowania nowych obiektów w okresie T ,

$TC_{odz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów odzysku obiektów wycofanych z eksploatacji w okresie T ,

$TC_{prod,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów produkcji nowych obiektów w okresie T ,

$TC_{b,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów wynikających z niezrealizowanego zapotrzebowania w okresie T .

$TC_{u,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$ - funkcja łącznych kosztów unieszkodliwienia obiektów w okresie T .

Oczekiwane koszty składowania obiektów wycofanych z eksploatacji w okresie T można przedstawić za pomocą wzoru:

$$TC_{skz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_{skz} \cdot I_{z,i}), \quad (3.63)$$

gdzie:

k_{skz} - jednostkowy koszt składowania obiektów wycofanych z eksploatacji,

$I_{z,i}$ - wielkość zapasu znajdującego się w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji w i -tym okresie.

Oczekiwane koszty składowania nowych obiektów w okresie T można przedstawić za pomocą wzoru:

$$TC_{sknp,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_{sknp} \cdot I_{np,i}), \quad (3.64)$$

gdzie:

k_{sknp} - jednostkowy koszt składowania nowych obiektów,

$I_{np,i}$ - wielkość zapasu znajdującego się w magazynie wyrobów finalnych w i -tym okresie.

Kolejną składową łącznych kosztów funkcjonowania systemu odzysku są koszty realizacji procesów odzysku obiektów wycofanych z eksploatacji. Wielkość tych kosztów w okresie T można przedstawić za pomocą wzoru:

$$TC_{odz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_{odz} \cdot Q_{odz,i}), \quad (3.65)$$

gdzie:

k_{odz} - jednostkowy koszt odzysku obiektów wycofanych z eksploatacji,

$Q_{odz,i}$ - wielkość partii odzysku obiektów wycofanych, realizowanego w i -tym okresie.

W analogiczny sposób wyznaczyć można łączne koszty realizacji procesów produkcyjnych w dowolnym okresie T :

$$TC_{prod,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_{prod} \cdot Q_{prod,i}), \quad (3.66)$$

gdzie:

k_{prod} - jednostkowy koszt produkcji nowego wyrobu,

$Q_{prod,i}$ - wielkość partii produkcyjnej, realizowanej w i -tym okresie.

Koszty związane z niezrealizowaniem zapotrzebowania na nowe obiekty można przedstawić w następujący sposób:

$$TC_{b,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_b \cdot B_i), \quad (3.67)$$

gdzie:

k_b - jednostkowy koszt braku w zapasie,

B_i - wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych w i -tym okresie z analizowanego horyzontu planowania.

Łączne koszty unieszkodliwienia obiektów w okresie T można przedstawić za pomocą wzoru:

$$TC_{u,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T (k_u \cdot Q_{u,i}), \quad (3.68)$$

gdzie:

k_u - jednostkowy koszt unieszkodliwienia obiektu,

$Q_{u,i}$ - wielkość partii w procesie unieszkodliwiania obiektów wycofanych z eksploatacji w i -tym okresie.

W modelowanym systemie nie uwzględnia się opóźnień w realizacji poszczególnych procesów. Prowadzi to do założenia, że każda partia produkcyjna i partia odzysku są dostępne po ustalonym okresie czasu.

Funkcja łącznych kosztów funkcjonowania systemu w dowolnym okresie T może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u) = \sum_{i=1}^T \left(k_{skz} \cdot I_{z,i} + k_{sknp} \cdot I_{np,i} + k_{odz} \cdot Q_{odz,i} + k_{prod} \cdot Q_{prod,i} + k_b \cdot B_i + k_u \cdot Q_{u,i} \right). \quad (3.69)$$

W modelowanym systemie nie uwzględnia się kosztów stałych związanych z uruchomieniem poszczególnych procesów.

4. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI ANALITYCZNEGO MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO

4.1. Analiza wrażliwości modelu prognostycznego

Kolejnym etapem pracy jest analiza wrażliwości parametrów opracowanego modelu prognostycznego. W procesie analizy modelu matematycznego przyjęto następujące założenia:

- liczba obiektów technicznych wprowadzanych do systemu eksploatacji w jednostce czasu jest stała, tzn.:

$$D_{zr}(t_e) = D_{zr}; \quad (4.1)$$

- analizowany obiekt techniczny jest jednoelementowy;
- chwila wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji jest jednocześnie chwilą rozpoczęcia pracy obiektu;
- obiekt techniczny pracuje nieprzerwanie od chwili uruchomienia do chwili powstania uszkodzenia;
- czasy poprawnej pracy obiektów technicznych znajdujących się w systemie eksploatacji są opisane rozkładem wykładniczym.

W przeprowadzanej analizie założono, że system eksploatacji funkcjonuje dłużej niż $t_a - \tau_{dop}$ jednostek czasu, co oznacza, że zachodzi zależność:

$$t_a - \tau_{dop} \geq 0; \quad (4.2)$$

W tabeli 4.1 przedstawiono zakres zmienności oraz wartości wyjściowe poszczególnych parametrów wejściowych analizowanego modelu analitycznego. Zakres zmienności parametrów wejściowych został ustalony w obszarze istotnych zmian parametrów wyjściowych modelu. Poza wskazanym zakresem zmienność parametrów wejściowych nie ma znaczącego wpływu na wyniki modelu.

Analizę wrażliwości analitycznego modelu prognostycznego ograniczono do oceny następujących parametrów wyjściowych:

- liczby obiektów wycofywanych z eksploatacji w jednostce czasu dla przedziału

$$[t_a, t_b] \frac{PN_{[t_a, t_b]}}{\Delta_{t_a, t_b}},$$

gdzie:

$\Delta_{t_a t_b}$ - długość przedziału $[t_a, t_b]$,

– stosunku zmiennych losowych $\frac{PN_{1,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$, $\frac{PN_{2,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$ oraz $\frac{PN_{3,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$.

Dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ $\frac{PN_{1,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$ oraz $\frac{PN_{2,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$ dotyczą obiektów technicznych

wprowadzonych do systemu eksploatacji przed początkiem okresu $[t_a, t_b]$. Dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$

obiektów, których $t_e < t_a$ dotyczy wyłącznie $\frac{PN_{1,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}}$.

Tabela 4.1. Zakres zmienności parametrów wejściowych modelu prognostycznego

Lp.	Oznaczenie	Wielkość wyjściowa	Zakres zmienności (min:skok:max)	Objaśnienie
1	λ	cały zakres	0,1:0,05:1	intensywność uszkodzeń obiektów technicznych
2	$\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$	cały zakres	0,1:0,1:2,0	stosunek długości dopuszczalnego czasu do uszkodzenia do długości analizowanego okresu $[t_a, t_b]$
3	D_{zr}	10	brak	liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji w jednostce czasu

Przy założeniu stałej liczby obiektów technicznych wprowadzanych do systemu eksploatacji w jednostce czasu, wykładniczego charakteru czasów poprawnej pracy obiektów technicznych znajdujących się w systemie eksploatacji oraz tego, że obiekt jest jednoelementowy, formuły matematyczne wykorzystywane w modelu prognostycznym przyjmują następujące postaci zebrane w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Analityczne postaci formuł matematycznych wykorzystywanych w modelu prognostycznym

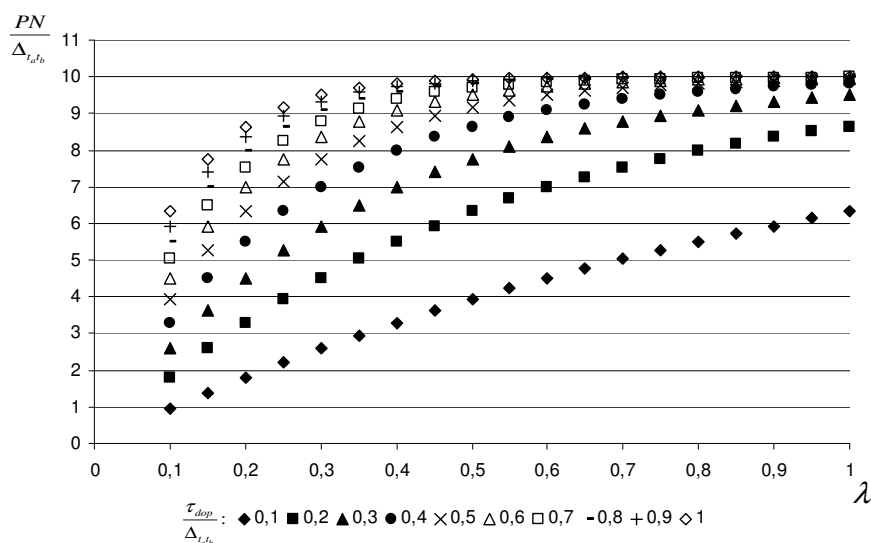
Formuła		Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
$F(x_1, x_2)$	3.15	$= \exp(-\lambda x_1) - \exp(-\lambda x_2)$
Dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$		
$PN_{1,[t_a, t_b]}$	3.16	$= D_{zr} \cdot \left[\frac{\exp(-\lambda t_a)}{\lambda} \cdot (\exp(\lambda(t_b - \tau_{dop})) - \exp(\lambda \cdot \max(t_a - \tau_{dop}, 0))) - \right. \\ \left. + \exp(-\lambda \tau_{dop}) \cdot (t_b - \tau_{dop} - \max(t_a - \tau_{dop}, 0)) \right]$
$PN_{2,[t_a, t_b]}$	3.17	$= \frac{D_{zr}}{\lambda} \cdot (\exp(-\lambda t_a) - \exp(-\lambda t_b)) \cdot (\exp(\lambda t_a) - \exp(\lambda(t_b - \tau_{dop})))$
$PN_{3,[t_a, t_b]}$	3.18	$= D_{zr} \cdot \left(t_b - t_a - \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \exp(\lambda(t_a - t_b)) \right) \right)$
$\frac{PN_{[t_a, t_b]}}{\Delta_{t_a t_b}}$		$= \frac{D_{zr} \cdot \left[\frac{\exp(-\lambda t_a)}{\lambda} \cdot (\exp(\lambda(t_b - \tau_{dop})) - \exp(\lambda \cdot \max(t_a - \tau_{dop}, 0))) - \right. \\ \left. + \exp(-\lambda \tau_{dop}) \cdot (t_b - \tau_{dop} - \max(t_a - \tau_{dop}, 0)) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\lambda} \cdot (\exp(-\lambda t_a) - \exp(-\lambda t_b)) \cdot (\exp(\lambda t_a) - \exp(\lambda(t_b - \tau_{dop}))) + \right. \\ \left. + t_b - t_a - \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \exp(\lambda(t_a - t_b)) \right) \right]}{(t_b - t_a)}$
Dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$		
$PN_{1,[t_a, t_b]}$	3.28	$= D_{zr} \cdot \left[\frac{\exp(-\lambda t_a)}{\lambda} \cdot (\exp(\lambda t_a) - \exp(\lambda \cdot \max(t_a - \tau_{dop}, 0))) - \right. \\ \left. + \exp(-\lambda \tau_{dop}) \cdot (t_a - \max(t_a - \tau_{dop}, 0)) \right]$
$PN_{2,[t_a, t_b]}$	3.29	$= D_{zr} \cdot (1 - \exp(-\lambda \tau_{dop})) \cdot (t_b - t_a - \tau_{dop})$
$PN_{3,[t_a, t_b]}$	3.30	$= D_{zr} \cdot \left(\tau_{dop} - \frac{1}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda \tau_{dop})) \right)$

Formuła	Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
$\frac{PN_{[t_a, t_b]}}{\Delta_{t_a t_b}}$	$D_{zr} \cdot \frac{\left[\frac{\exp(-\lambda t_a)}{\lambda} \cdot (\exp(\lambda t_a) - \exp(\lambda \cdot \max(t_a - \tau_{dop}, 0))) - \exp(-\lambda \tau_{dop}) \cdot \left(t_a - \max(t_a - \tau_{dop}, 0) \right) + (1 - \exp(-\lambda \tau_{dop})) \cdot \left(t_b - t_a - \tau_{dop} - \frac{1}{\lambda} \right) + \tau_{dop} \right]}{(t_b - t_a)}$

W kolejnych podrozdziałach omówione zostały wyniki analizy wrażliwości parametrów wyjściowych modelu prognostycznego na zmiany poszczególnych parametrów wejściowych.

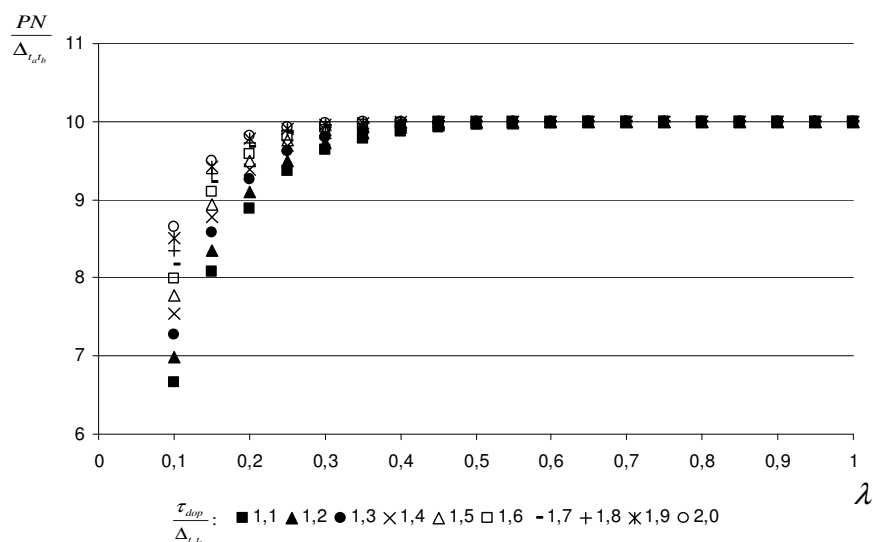
4.1.1. Intensywność uszkodzeń obiektów technicznych

Czas poprawnej pracy obiektów technicznych znajdujących się w systemie eksploatacji, w bezpośredni sposób wpływa na liczbę obiektów wprowadzanych do systemu odzysku.



Rys. 4.1. Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji, w jednostce czasu dla przedziału $[t_a, t_b]$, w

funkcji zmiany parametru λ , dla poszczególnych wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$



Rys. 4.2. Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji, w jednostce czasu dla przedziału $[t_a, t_b]$, w

funkcji zmiany parametru λ , dla poszczególnych wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$

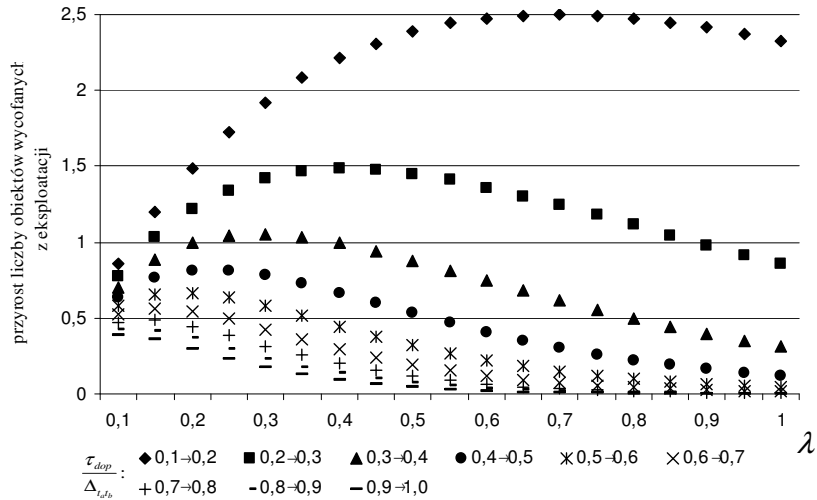
Na rys. 4.1 oraz rys. 4.2 pokazano jak zmiana parametru λ wpływa na liczbę obiektów wycofywanych z eksploatacji w jednostce czasu. Analizie poddano różne serie danych zależne od wartości współczynnika określającego stosunek zmiennych τ_{dop} oraz $\Delta_{t_a t_b}$.

Na rys. 6.1 $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ zmienia się w zakresie od 0,1 do 1,0 a na rys. 6.2 od 1,1 do 2,0.

Dla wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ z zakresu od 0,1 do 1,0 liczba obiektów wycofanych z eksploatacji w jednostce czasu rośnie, dla wszystkich serii danych, w miarę wzrastania wartości parametru λ . Wartością graniczną jest liczba obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji. Dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 0,1$ zmiana liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w zależności od parametru λ ma charakter zbliżony do liniowego z współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,98$. Na rys. 4.3 oraz rys. 4.4 pokazano zmianę funkcji opisującej przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji spowodowany zmianą wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ w zależności od parametru λ . Funkcja ta początkowo rośnie wraz ze wzrostem wartości parametru λ , aż do osiągnięcia maksimum, a później maleje. Istotną zmianę w liczbie

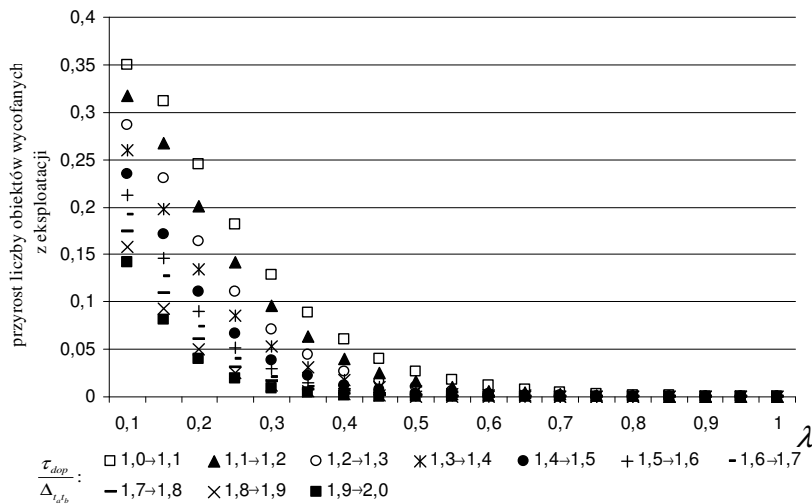
obiektów wycofanych z eksploatacji powoduje zmiana $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ z wartości 0,1 na 0,2. Przy tej zmianie przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji osiąga maksimum dla $\lambda = 0,7$, a później nieznacznie spada. Znaczący przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji powodują zmiany współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ z 0,2 na 0,3 oraz z 0,3 na 0,4. Dla tych zmian funkcja opisująca przyrost liczby obiektów osiąga maksimum odpowiednio dla $\lambda = 0,4$ i $\lambda = 0,3$. Wraz ze wzrostem współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ następuje przesunięcie w lewo punktu przegięcia funkcji określającej przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji oraz maleje wpływ parametru λ na przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji.

Dla wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ z zakresu od 1,1 do 2,0 liczba obiektów wycofanych z eksploatacji w jednostce czasu dąży, w miarę wzrastania wartości parametru λ , do wartości granicznej równej liczbie obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji. Przyrost liczby obiektów wycofanych eksploatacji spowodowany wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ jest mało znaczący. Największy jest dla $\lambda = 0,1$, a dla $\lambda = 0,7$ osiąga wartość bliską zeru niezależnie od wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$.



Rys. 4.3. Przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w jednostce czasu dla przedziału

$[t_a, t_b]$, w funkcji zmiany parametru λ , dla zmiany poszczególnych wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$



Rys. 4.4. Przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w jednostce czasu dla przedziału

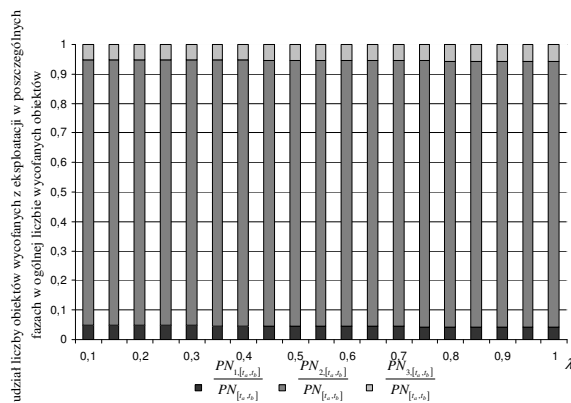
$[t_a, t_b]$, w funkcji zmiany parametru λ , dla zmiany poszczególnych wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$

W kolejnym kroku zbadano wpływ zmiany parametru λ na udział obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach, w ogólnej liczbie obiektów wycofanych z eksploatacji. Na rys. 4.5 – 4.10 pokazano przebieg tych zmian dla poszczególnych wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$. Dla $t_b - t_a \geq \tau_{dop}$ (wybrane wyniki przedstawiono na rys. 4.5 – 4.7)

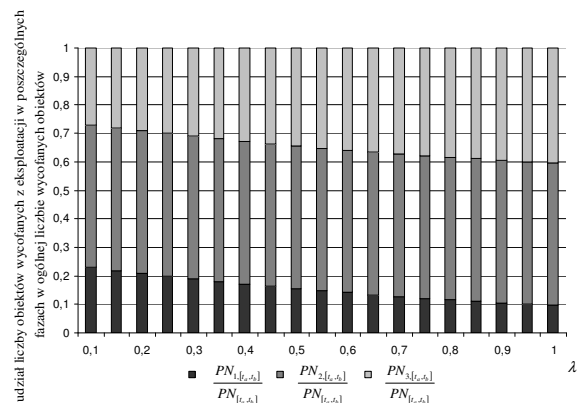
udział pierwszej fazy rośnie wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ i maleje przy zwiększającym się parametrze λ . Dla wartości współczynnika z zakresu od 0,1 do 1,0 udział drugiej fazy maleje wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$, ale jest niezależny od parametru λ i może być opisany następującym wzorem:

$$\frac{PN_{2,[t_a,t_b]}}{PN_{[t_a,t_b]}} = 1 - \frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}. \quad (4.3)$$

Dla $t_b - t_a < \tau_{dop}$ (wybrane wyniki przedstawiono na rys. 4.8 – 4.10) udział pierwszej fazy maleje wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ i parametru λ . Udział drugiej fazy rośnie wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ i maleje przy zwiększającym się parametrze λ . Dla obiektów technicznych charakteryzujących się intensywnością uszkodzeń zbliżoną do jedności, przy prognozowaniu liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, istotne jest monitorowanie obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji w analizowanym okresie $[t_a, t_b)$. Znacznie mniejsze znaczenie mają obiekty wprowadzone do systemu przed chwilą t_a .

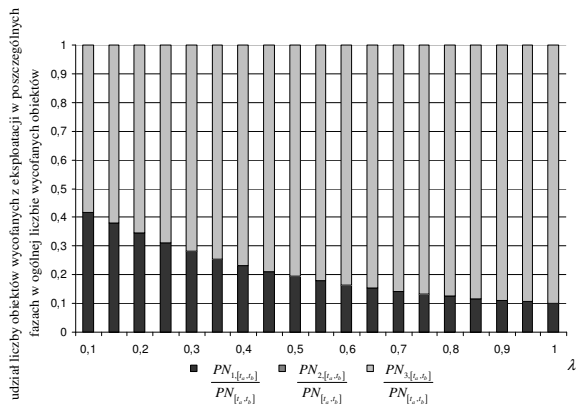


Rys. 4.5. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 0,1$

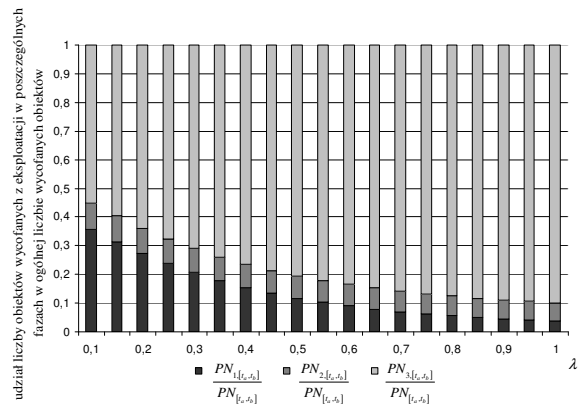


Rys. 4.6. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych

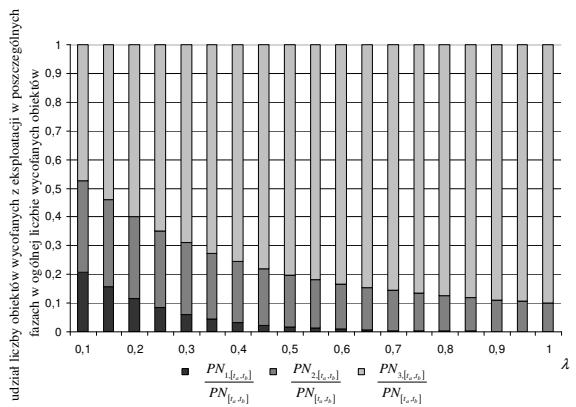
obektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 0,5$



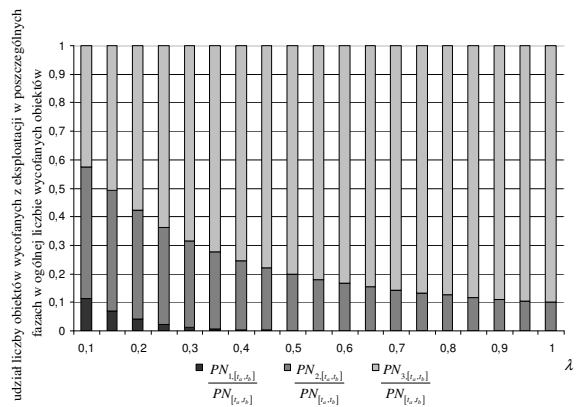
Rys. 4.7. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 1,0$



Rys. 4.8. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 1,1$



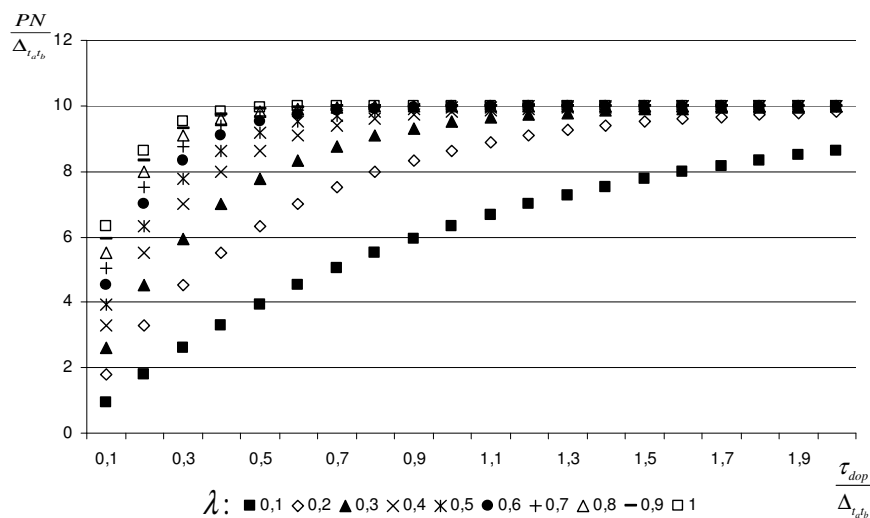
Rys. 4.9. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 1,5$



Rys. 4.10. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany λ , dla $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 2,0$

4.1.2. Współczynnik $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$

Na rys. 4.11 pokazano wpływ zmiany wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ na liczbę obiektów wycofanych z eksploatacji w jednostce czasu. Ocenie poddano obiekty charakteryzujące się różną intensywnością uszkodzeń. Największe znaczenie ma zmiana współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ dla obiektów opisanych parametrem $\lambda = 0,1$. Najmniejszy wpływ na przyrost liczby obiektów wycofanych z eksploatacji ma zmiana wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ dla obiektów charakteryzujących się intensywnością uszkodzeń bliską jedności. Dla tych obiektów liczba zwrotów zbliża się do wartości granicznej już przy $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}} = 0,4$.

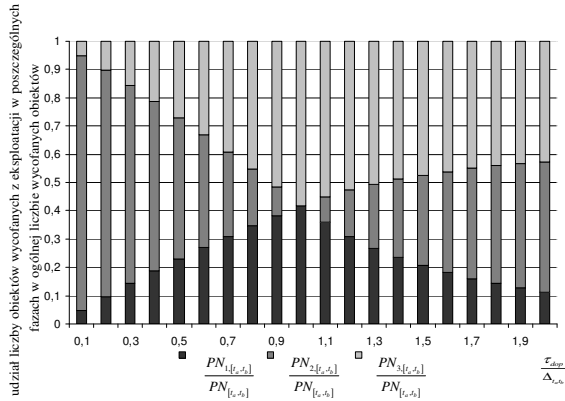


Rys. 4.11. Liczba obiektów wycofanych z eksploatacji, w jednostce czasu dla przedziału $[t_a, t_b]$, w

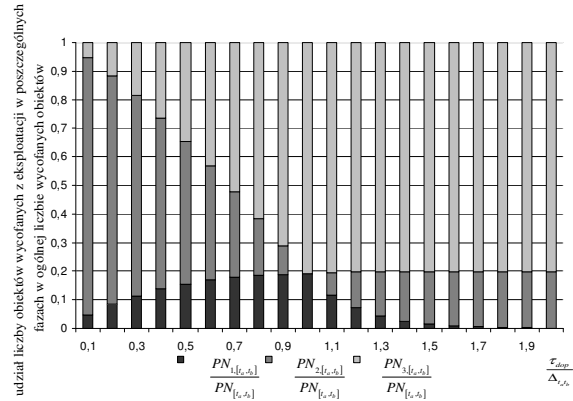
funkcji zmiany współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$, dla poszczególnych wartości parametru λ

W kolejnym kroku zbadano wpływ zmiany współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ na udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji w poszczególnych fazach w ogólnej liczbie obiektów wycofanych z eksploatacji. Na rys. 4.12 – 4.14 pokazano przebieg tych zmian dla wybranych

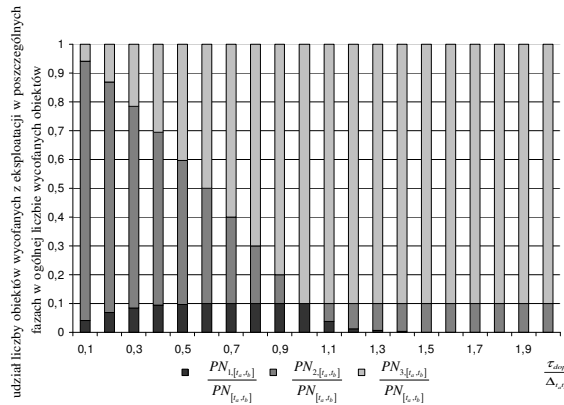
wartości parametru λ . Pokazano, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$ rośnie, w procesie prognozowania liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, znaczenie obiektów wprowadzonych do systemu eksploatacji przed chwilą t_a . Jednocześnie pokazano, iż przyrost ten maleje wraz ze zwiększaniem się wartości parametru λ .



Rys. 4.12. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$, dla $\lambda = 0,1$



Rys. 4.13. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$, dla $\lambda = 0,5$



Rys. 4.14. Udział liczby obiektów wycofanych z eksploatacji, w poszczególnych fazach PN_1 , PN_2 oraz PN_3 , w ogólnej liczbie wycofanych obiektów, w funkcji zmiany $\frac{\tau_{dop}}{\Delta_{t_a t_b}}$, dla $\lambda = 1,0$

4.2. Analiza wrażliwości modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji

Kolejnym etapem pracy jest analiza wrażliwości parametrów opracowanego modelu systemu wsparcia logistycznego. W procesie analizy modelu matematycznego przyjęto następujące założenia:

- wielkość zapotrzebowania zgłaszanego przez system eksploatacji w poszczególnych okresach D_T jest stała;
- analizowany obiekt techniczny jest jednoelementowy;
- chwila wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji jest jednocześnie chwilą rozpoczęcia pracy obiektu;
- obiekt techniczny pracuje nieprzerwanie od chwili uruchomienia do chwili powstania uszkodzenia;
- czasy poprawnej pracy obiektów technicznych znajdujących się w systemie eksploatacji są opisane rozkładem wykładniczym;
- w pierwszym okresie realizowana jest tylko produkcja i nie występuje zapotrzebowanie na nowe wyroby:

$$D_1 = 0;$$

- wielkość zapasu znajdującego się w magazynie wyrobów finalnych na początku drugiego okresu jest równa sumie wielkości partii produkcyjnej i poziomu informacyjnego:

$$I_{np,1} = Q_{prod} + s; \quad (4.4)$$

- wielkości partii produkcyjnej i partii odzysku są stałe dla całego horyzontu planowania;
- koszty utrzymania zapasów obiektów uszkodzonych są niższe niż obiektów nowych:

$$k_{skz} < k_{sknp}; \quad (4.5)$$

- koszty realizacji procesów odzysku są niższe niż procesów produkcji:

$$k_{odz} < k_{prod}. \quad (4.6)$$

W przeprowadzanej analizie rozpatrzono i porównano następujące sytuacje:

- obiekty pracujące w systemie eksploatacji nie ulegają uszkodzeniom,
- obiekty pracujące w systemie eksploatacji ulegają uszkodzeniom i są zwracane do systemu odzysku.

Analizę wrażliwości analitycznego modelu systemu wsparcia logistycznego ograniczono do oceny zmienności z następujących parametrów wyjściowych:

- wartości średniej całkowitych kosztów funkcjonowania systemu \overline{TC} dla analizowanego horyzontu planowania H :

$$\overline{TC} = \frac{\sum_{T=1}^H TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{H}. \quad (4.7)$$

- całkowitych kosztów utrzymania zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{skz,H} = \frac{TC_{skz,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.8)$$

- łącznych kosztów utrzymania zapasu nowych obiektów wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{sknp,H} = \frac{TC_{sknp,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.9)$$

- łącznych kosztów realizacji procesów odzysku wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{odz,H} = \frac{TC_{odz,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.10)$$

- łącznych kosztów realizacji procesów produkcji wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{prod,H} = \frac{TC_{prod,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.11)$$

- łącznych kosztów wystąpienia braków w zapasie nowych obiektów wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{b,H} = \frac{TC_{b,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.12)$$

- łącznych kosztów unieszkodliwienia obiektów wyrażonych przez udział tych kosztów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu:

$$UTC_{u,H} = \frac{TC_{u,H}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_H(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}, \quad (4.13)$$

- wskaźnika poziomu obsługi systemu eksploatacji:

$$POZ_{SE,H} = \frac{TD_{zr,H}}{TD_H}, \quad (4.14)$$

gdzie:

TD_H - łączna wielkość zapotrzebowania zgłoszonego przez system eksploatacji:

$$TD_H = \sum_{T=1}^H D_T, \quad (4.15)$$

$TD_{zr,H}$ - łączna wielkość zrealizowanego zapotrzebowania:

$$TD_{zr,H} = \sum_{T=1}^H D_{zr,T} = \sum_{T=1}^H (D_T - B_T), \quad (4.16)$$

gdzie:

$D_{zr,T}$ - wielkość zrealizowanego zapotrzebowania w okresie T ,

B_T - wielkość braku w zapasie w okresie T .

- średniej liczby obiektów zwróconych do systemu w analizowanym horyzoncie czasu H :

$$\overline{LZ} = \frac{\sum_{T=1}^H PN_{[t_{T-1}, t_T]}}{H}. \quad (4.17)$$

W tabeli 4.3 przedstawiono zakres zmienności oraz wartości wyjściowe poszczególnych parametrów wejściowych analizowanego modelu. Zakres zmienności parametrów wejściowych został ustalony w obszarze istotnych zmian parametrów wyjściowych modelu. Poza wskazanym zakresem zmienność parametrów wejściowych nie ma znaczącego wpływu na wyniki modelu.

Tabela 4.3. Zakres zmienności parametrów wejściowych modelu wsparcia logistycznego

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
1	λ	cały zakres	0,2:0,2:1,0	intensywność uszkodzeń obiektów technicznych

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
2	H	101	Brak	długość analizowanego horyzontu planowania
3	τ_{dop}	1	1:1:20	dopuszczalny czas do uszkodzenia
4	D_T	10	Brak	wielkość zapotrzebowania zgłoszonego przez system eksploatacji w okresie T
5	Q_{prod}	10	1:1:50	wielkość partii produkcyjnej
6	Q_{odz}	5	1:1:25	wielkość partii odzysku
7	s	5	0:5:100	poziom informacyjny zapasu wyrobów finalnych informuje o konieczności uzupełnienia zapasu
8	s_u	10	Brak	poziom informacyjny zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji – informuje o konieczności uruchomienia procesu unieszkodliwiania
9	T_{prz}	1	1:1:20	okres przeglądu
10	k_{sknp}	2	Brak	stały jednostkowy koszt utrzymania zapasu nowych obiektów
11	k_{skz}	1	Brak	stały jednostkowy koszt utrzymania zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji
12	k_{prod}	20	Brak	stały jednostkowy koszt wytworzenia nowych obiektów
13	k_{odz}	10	Brak	stały jednostkowy koszt odzysku uszkodzonych obiektów
14	k_u	0,5	Brak	stały jednostkowy koszt unieszkodliwiania uszkodzonych obiektów

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
15	k_b	5	Brak	stały jednostkowy koszt kary finansowej związany z wystąpieniem braku w zapasie wyrobów finalnych

Przy założeniu stałej liczby obiektów technicznych wprowadzanych do systemu eksploatacji w jednostce czasu, wykładniczego charakteru czasu poprawnej pracy obiektów technicznych oraz tego, że obiekt jest jednoelementowy, formuły matematyczne wykorzystywane w modelu systemu wsparcia logistycznego przyjmują następujące postaci zebrane w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Analityczne postaci formuł matematycznych wykorzystywanych w analizie wrażliwości modelu wsparcia logistycznego

<i>Formuła</i>		<i>Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego</i>
$POZ_{SE,T}$	4.14	$= \frac{\sum_{i=1}^T \left(D_i - \left \min \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \right \right)}{\sum_{i=1}^T D_i}$
\overline{LZ}	4.17	$= \frac{\sum_{i=1}^T PN_{[t_{i-1}, t_i]}}{T}$
$UTC_{skz,T}$	4.8	$= \frac{TC_{skz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$
$UTC_{sknp,T}$	4.9	$= \frac{TC_{sknp,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$
$UTC_{odz,T}$	4.10	$= \frac{TC_{odz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$
$UTC_{prod,T}$	4.11	$= \frac{TC_{prod,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$

Formuła		Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
$UTC_{b,T}$	4.12	$= \frac{TC_{b,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$
$UTC_{u,T}$	4.13	$= \frac{TC_{u,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}{TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)}$
gdzie:		
$TC_{skz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.63	$= \sum_{i=1}^T \left(k_{skz} \cdot \left(I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - \left((I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - s_u) \cdot U_i \right) \right) \right)$
$TC_{sknp,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.64	$= \sum_{i=1}^T \left(k_{sknp} \cdot \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \right)$
$TC_{odz,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.65	$= \sum_{i=1}^T (k_{odz} \cdot Q_{odz} \cdot X_i)$
$TC_{prod,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.66	$= \sum_{i=1}^T (k_{prod} \cdot Q_{prod} \cdot Y_i)$
$TC_{b,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.67	$= \sum_{i=1}^T \left(k_b \cdot \left \min \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \right \right)$
$TC_{u,T}(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.68	$= \sum_{i=1}^T \left(k_u \cdot \left(I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - s_u \right) \cdot U_i \right)$
$TC_T(s, Q_{prod}, Q_{odz}, s_u)$	3.62	$= \sum_{i=1}^T \left(k_{skz} \cdot \left(I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - \left((I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - s_u) \cdot U_i \right) \right) + \right. \\ \left. + k_{sknp} \cdot \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} + \right. \\ \left. + k_{odz} \cdot Q_{odz} \cdot X_i + k_{prod} \cdot Q_{prod} \cdot Y_i + \right. \\ \left. + k_b \cdot \left \min \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \right + \right. \\ \left. + k_u \cdot \left(I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i - s_u \right) \cdot U_i \right)$
gdzie:		

Formuła		Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
X_i	3.9	$= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ gdy } \left\{ \begin{array}{l} \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} \geq Q_{odz} \\ \text{oraz} \\ i \in V_{T_{prz}} \end{array} \right\} \\ \\ 0 \text{ gdy } \left\{ \begin{array}{l} \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} > s \\ \text{lub} \\ \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} < Q_{odz} \\ \text{lub} \\ i \notin V_{T_{prz}} \end{array} \right\} \end{array} \right.$
Y_i	3.11	$= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ gdy } \left\{ \begin{array}{l} \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} < Q_{odz} \\ \text{oraz} \\ i \in V_{T_{prz}} \end{array} \right\} \\ \\ 0 \text{ gdy } \left\{ \begin{array}{l} \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} > s \\ \text{lub} \\ \max \{ I_{np,i-1} + Q_{odz} \cdot X_{i-1} + Q_{prod} \cdot Y_{i-1} - D_i, 0 \} \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} \geq Q_{odz} \\ \text{lub} \\ i \notin V_{T_{prz}} \end{array} \right\} \end{array} \right.$
U_i	3.13	$= \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ gdy } (I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i) > s_u \text{ oraz } i \in V_{T_{prz}} \\ 0 \text{ gdy } (I_{z,i-1} + PN_{[t_{i-1}, t_i]} - Q_{odz} \cdot X_i) \leq s_u \text{ lub } i \notin V_{T_{prz}} \end{array} \right.$

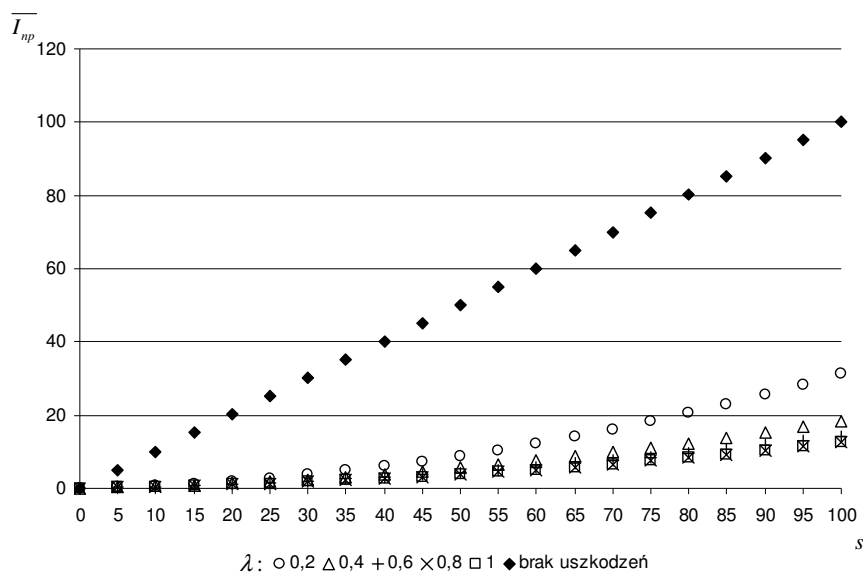
Formuła		Ogólna postać formuły dla rozkładu wykładniczego
$PN_{[t_{i-1}, t_i]}$	3.41 oraz 3.59	$= \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t_e=\max(t_{i-1}-\lceil\tau_{dop}\rceil, 0)}^{t_i-\lceil\tau_{dop}\rceil} \left((D_{t_e} - B_{t_e}) \cdot \left(\frac{\exp(-\lambda(t_{i-1}-t_e)) - 1}{\exp(-\lambda\tau_{dop}) - 1} \right) \right) + \\ + \sum_{t_e=t_i-\lceil\tau_{dop}\rceil+1}^{i-1} \left((D_{t_e} - B_{t_e}) \cdot \left(\frac{\exp(-\lambda(t_{i-1}-t_e)) - 1}{\exp(-\lambda(t_i-t_e)) - 1} \right) \right) \\ \sum_{t_e=\max(t_{i-1}-\lceil\tau_{dop}\rceil, 0)}^{i-1} \left((D_{t_e} - B_{t_e}) \cdot \left(\frac{\exp(-\lambda(t_{i-1}-t_e)) - 1}{\exp(-\lambda)} \right) \right) \end{array} \right\} \text{gdyn } \tau_{dop} > 1$ $\sum_{t_e=\max(t_{i-1}-\lceil\tau_{dop}\rceil, 0)}^{i-1} \left((D_{t_e} - B_{t_e}) \cdot \left(\frac{\exp(-\lambda(t_{i-1}-t_e)) - 1}{\exp(-\lambda)} \right) \right) \text{gdyn } \tau_{dop} = 1$

W kolejnych podrozdziałach omówione zostały wyniki analizy wrażliwości analitycznego modelu systemu wsparcia logistycznego, na zmianę podstawowych parametrów wejściowych.

4.2.1. Poziom informacyjny

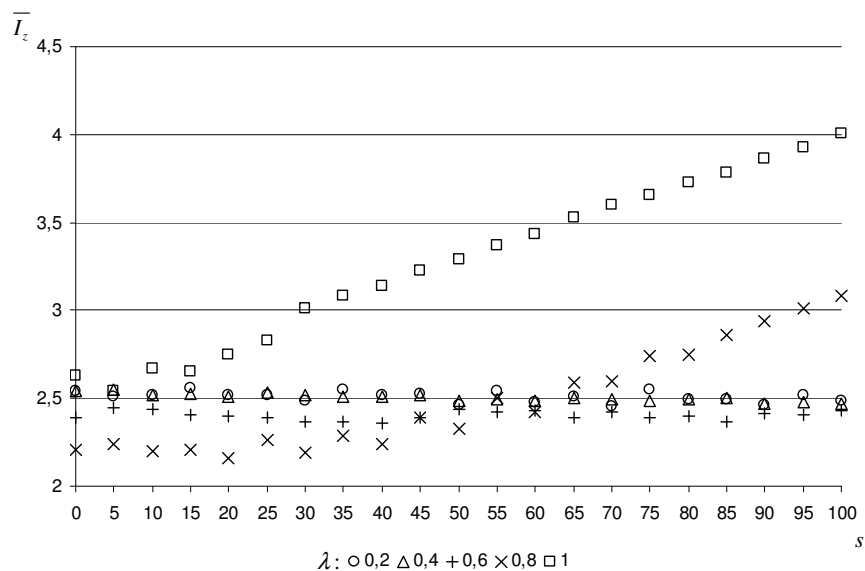
W modelach wsparcia logistycznego wartość poziomu informacyjnego jest związana z wielkością zapasu przechowywanego w magazynie wyrobów finalnych. Spadek wielkości zapasu poniżej wartości poziomu informacyjnego jest sygnałem do uruchomienia jednego z procesów: produkcji lub odzysku. Poziom informacyjny jest jednym z podstawowych parametrów sterujących wielkością zapasu magazynie.

Na rysunku 4.15 przedstawiono wpływ zmiany poziomu informacyjnego na wielkość zapasu w magazynie wyrobów finalnych.



Rys. 4.15. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu wyrobów finalnych, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

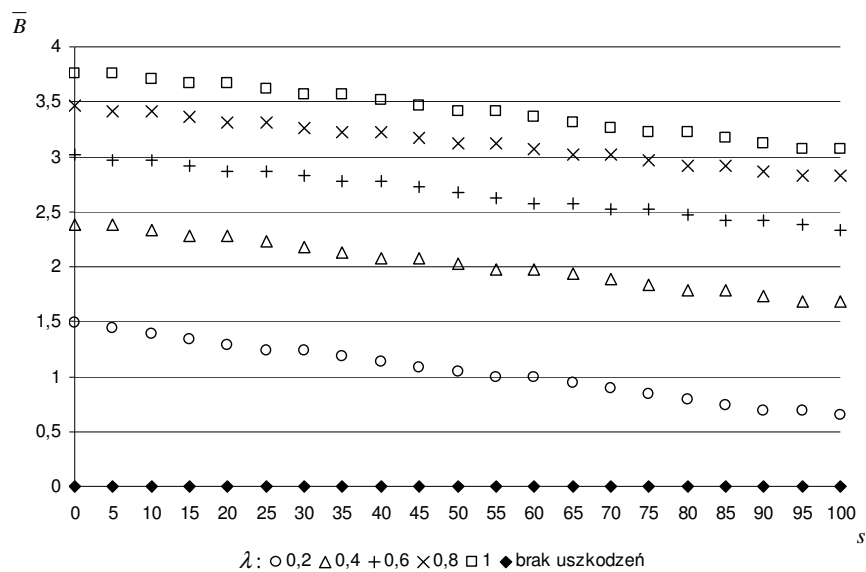
W systemie, w którym obiekty techniczne nie ulegają uszkodzeniom, wielkość zapasu wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wartości poziomu informacyjnego. W systemie, w którym obiekty ulegają uszkodzeniom wzrost oczekiwanej wielkości zapasu wyrobów finalnych zależy od wartości parametru określającego intensywność uszkodzeń obiektów technicznych. Wzrost wartości średniej poziomu zapasu wyrobów finalnych jest szybszy dla obiektów charakteryzujących się mniejszą intensywnością uszkodzeń. Zmiana poziomu informacyjnego wpływa również na oczekiwaną wielkość zapasu przechowywanego w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji. Na wykresie 4.16 przedstawiono zależność pomiędzy wartością parametru s , a oczekiwanym poziomem zapasu \bar{I}_z .



Rys. 4.16. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

Wpływ zmiany parametru s na poziom zapasu obiektów oczekujących na odzysk jest łatwo dostrzegalny dla obiektów charakteryzujących się większą intensywnością uszkodzeń ($\lambda=0,8$ oraz $1,0$). Wzrost wartości parametru s powoduje podwyższenie poziomu zapasu tych obiektów. Zwiększenie zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, przy ustalonym poziomie unieszkodliwiania $s_u=10$, powoduje wzrost liczby obiektów poddawanych unieszkodliwianiu. W systemie odzysku, dla założonych wartości parametrów wejściowych, zwiększenie poziomu informacyjnego powoduje wzrost wartości wskaźnika określającego poziom obsługi systemu eksploatacji. Największy wzrost poziomu obsługi można zaobserwować dla obiektów o niższej intensywności uszkodzeń ($\lambda=0,2$). Dla tych

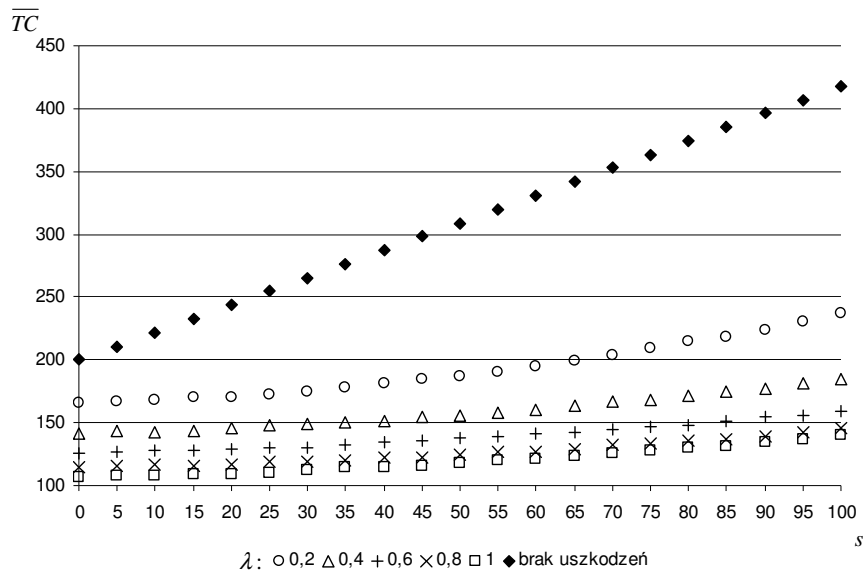
obiektów wzrost poziomu informacyjnego nie powoduje istotnego przyrostu liczby zwrotów do systemu. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych możliwe jest stwierdzenie, że poziom obsługi spada wraz ze wzrostem intensywności uszkodzeń obiektów technicznych. Jest to spowodowane większym udziałem mniej licznych partii odzysku. W przypadku braku uszkodzeń wskaźnik poziomu obsługi nie zależy od parametru s i jest równy jedności. Na wykresie 4.17 pokazano wpływ zmiany wartości parametru s na oczekiwaną wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania.



Rys. 4.17. Zmienność wartości średniej wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

W systemie odzysku wzrost wartości poziomu informacyjnego powoduje zmniejszenie oczekiwanej liczby uruchomień procesu produkcji oraz zwiększenie liczby uruchomień procesu odzysku.

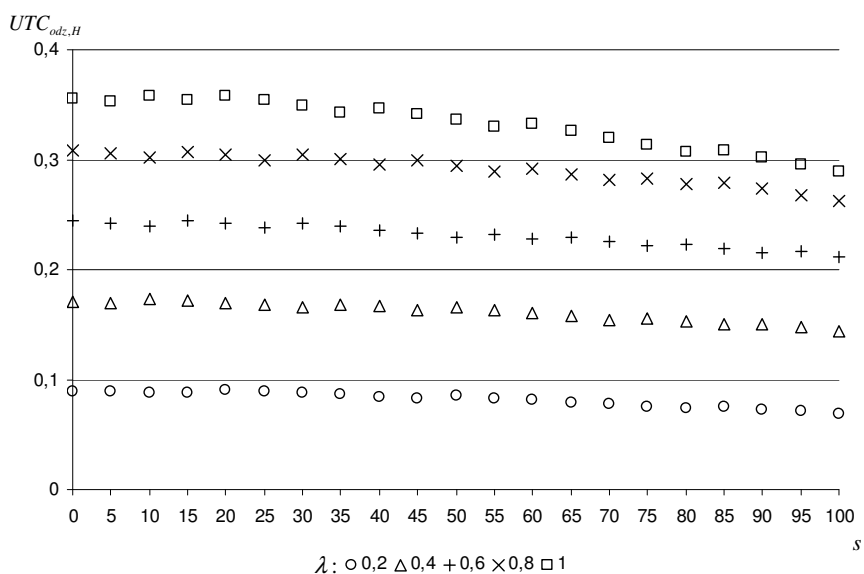
W analizowanym systemie wzrost wartości parametru s powoduje zwiększenie oczekiwanej wartości kosztów całkowitych. Zależność ta została przedstawiona na wykresie 4.18. Największe koszty funkcjonowania ponosi system, w którym nie powstają uszkodzenia, a zapotrzebowanie na nowe obiekty jest realizowane wyłącznie z produkcji. W takim systemie wartość oczekiwana kosztów całkowitych wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wartości parametru s . W systemie odzysku największy wzrost kosztów cechuje obiekty charakteryzujące się mniejszą intensywnością uszkodzeń.



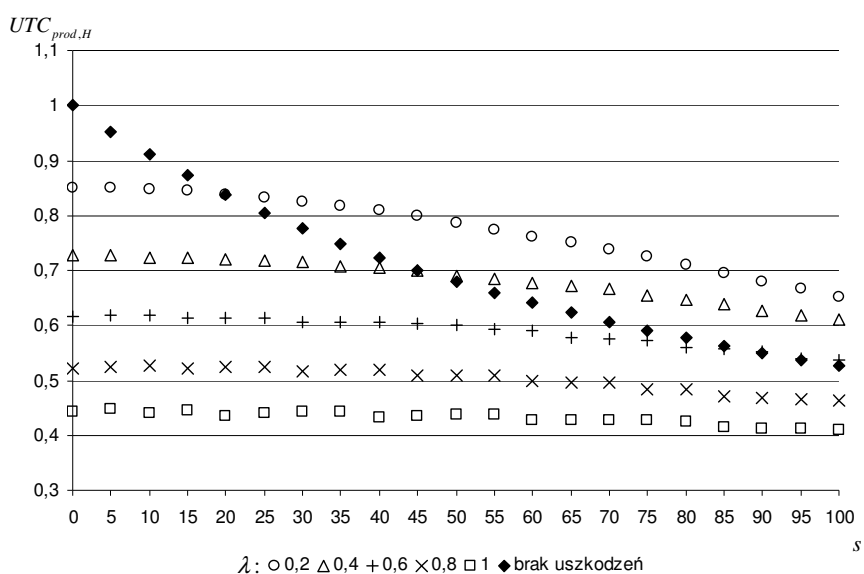
Rys. 4.18. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu , w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

W kolejnym kroku przeanalizowano wpływ zmiany wartości parametru s na udział poszczególnych kosztów składowych w ogólnych kosztach funkcjonowania systemu.

Na wykresach 4.19 oraz 4.20 pokazano zmianę udziału oczekiwanych kosztów realizacji procesu odzysku i produkcji. Udział kosztów realizacji procesów odzysku jest największy dla obiektów charakteryzujących się wysoką intensywnością uszkodzeń, ponieważ te obiekty charakteryzują się największą liczbą zwrotów do systemu. Udział kosztów odzysku maleje wraz ze wzrostem wielkości poziomu informacyjnego. Zmiana ta jest szczególnie widoczna dla obiektów o dużej intensywności uszkodzeń.



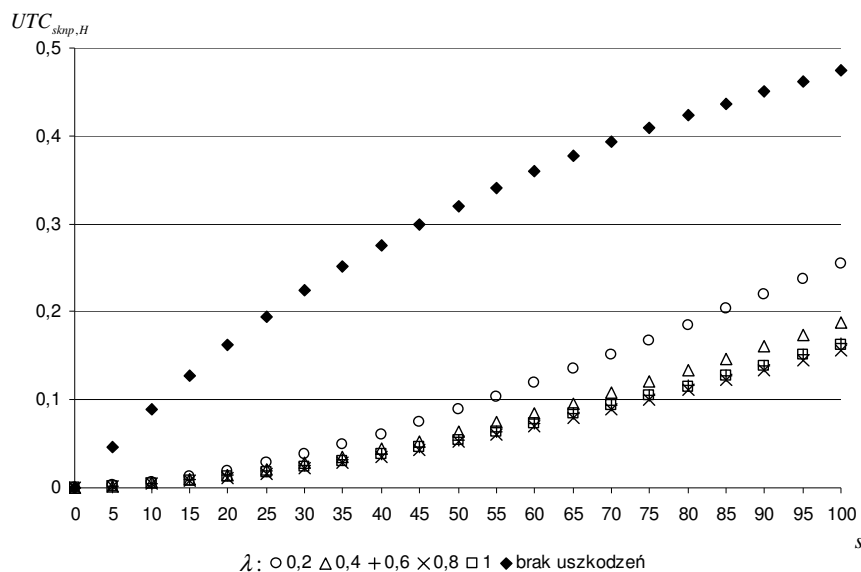
Rys. 4.19. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu odzysku, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ



Rys. 4.20. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu produkcji, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zwiększenie poziomu informacyjnego wpływa istotnie na udział kosztów związanych z realizacją procesów produkcyjnych. W systemie z brakiem uszkodzeń powoduje znaczne obniżenie udziału kosztów produkcji. W systemie odzysku udział kosztów produkcji początkowo nieznacznie rośnie (zmiana z $s = 0$ na $s = 5$), a później również maleje wraz ze

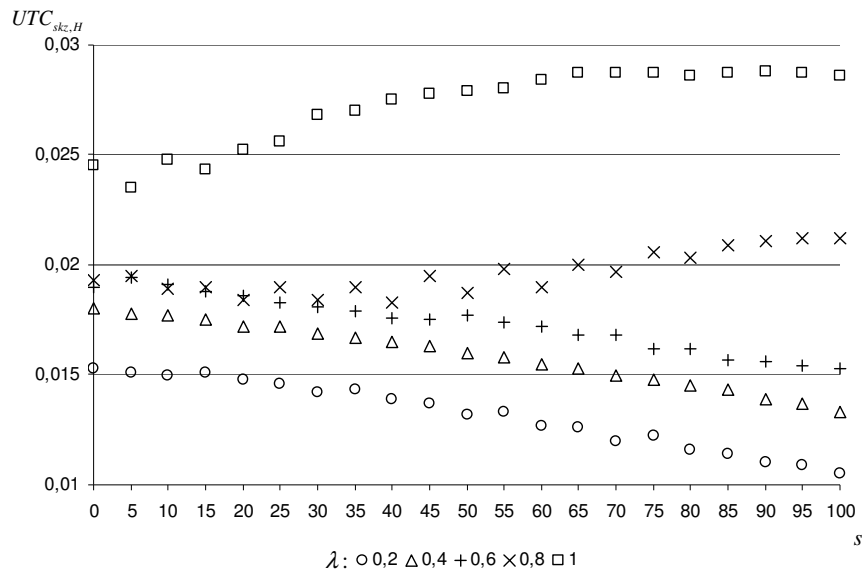
wzrostem poziomu informacyjnego. Największy spadek można zaobserwować dla obiektów o małej intensywności uszkodzeń. Jednocześnie dla tych obiektów udział kosztów produkcji w łącznych kosztach funkcjonowania systemu jest największy. W systemie z brakiem uszkodzeń obniżenie udziału kosztów produkcji jest dużo większe, niż w systemie odzysku (dla $s = 20$ udział kosztów produkcji jest niższy niż dla obiektów z $\lambda = 0,2$). Zmniejszenie udziału kosztów realizacji procesów produkcji oraz odzysku jest spowodowane rosnącymi kosztami składowania wyrobów finalnych. Dlatego na uwagę zasługuje również analiza wpływu zmiany wartości parametru s , na koszty utrzymania zapasów wyrobów finalnych. Zależność tą pokazano na wykresie 4.21. Wzrost wartości parametru s powoduje wzrost udziału kosztów składowania nowych obiektów. Największy wzrost można zaobserwować w systemie z brakiem uszkodzeń. W systemie odzysku najszybciej wzrasta udział oczekiwanych kosztów składowania dla obiektów, z niską intensywnością uszkodzeń ($\lambda = 0,2$ oraz $0,4$). Dla pozostałych obiektów udział kosztów składowania jest podobny. Jednakże dla $\lambda = 0,6$ łączne koszty funkcjonowania systemu są większe niż np. dla $\lambda = 0,8$, więc łączne koszty składowania nowych obiektów również będą większe.



Rys. 4.21. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów składowania wyrobów finalnych, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

Istotny jest także wpływ poziomu informacyjnego na koszty składowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Dla obiektów o dużej intensywności uszkodzeń ($\lambda = 0,8$ oraz

1,0) udział kosztów składowania wzrasta wraz ze wzrostem poziomu informacyjnego, a dla pozostałych spada. Zmianę udziału oczekiwanych kosztów składowania obiektów oczekujących na odzysk pokazano na wykresie 4.22.



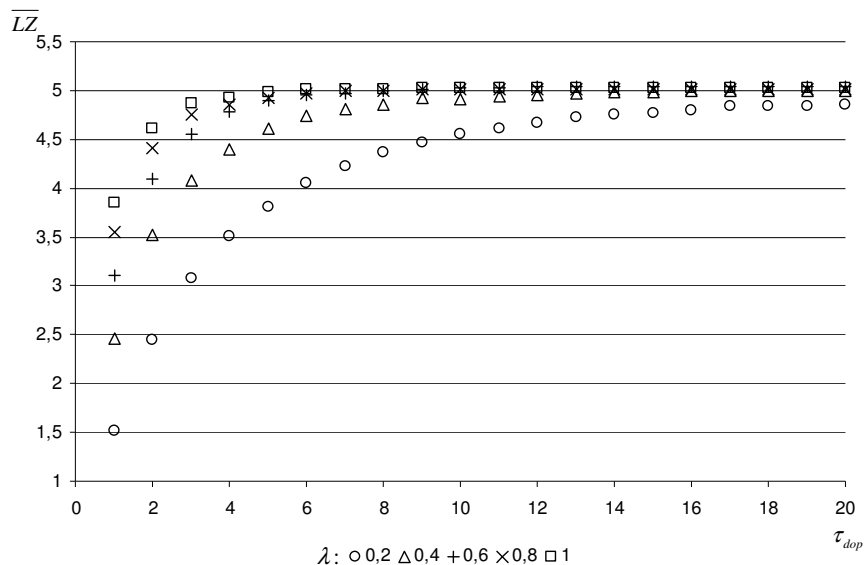
Rys. 4.22. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów składowania zwrotów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru s , dla poszczególnych wartości parametru λ

W kolejnym kroku przeprowadzono analizę wpływu zmiany parametru s na udział oczekiwanych kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania, który zmniejsza się dla wszystkich obiektów. Największy spadek występuje dla obiektów o dużej intensywności uszkodzeń i zmniejsza się dla obiektów o niższych wartościach parametru λ . Uzyskane wyniki pozwalają również na stwierdzenie, iż przy założonych wartościach parametrów wejściowych, zwiększenie kosztów unieszkodliwienia, na skutek wzrostu wartości parametru s , nie wywiera znaczącego wpływu na ogólne koszty funkcjonowania systemu odzysku.

4.2.2. Dopuszczalny czas do uszkodzenia

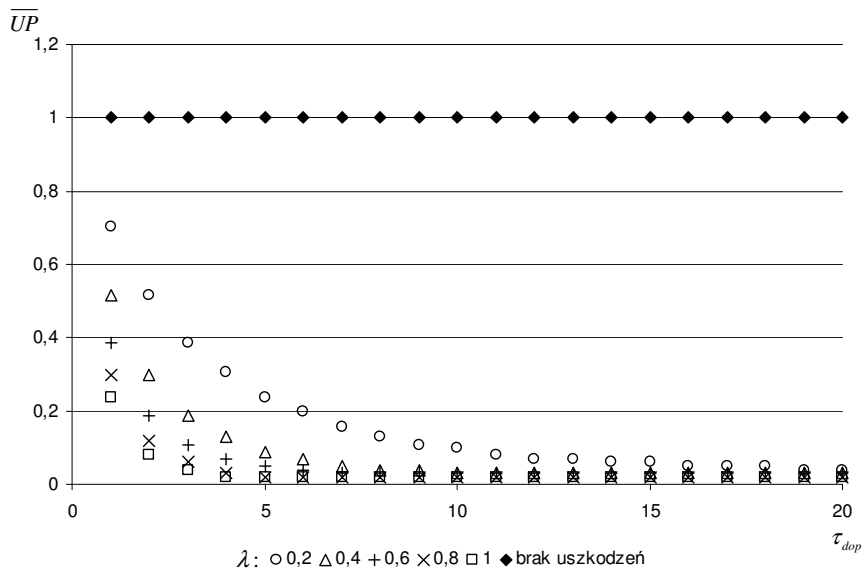
Kolejnym etapem analizy wrażliwości modelu wsparcia logistycznego jest ocena wpływu zmiany wartości parametru τ_{dop} na wartości poszczególnych parametrów wyjściowych modelu. Na wykresie 4.23 pokazano jak na oczekiwaną liczbę obiektów wycofywanych z eksploatacji wpływa wzrost wartości parametru τ_{dop} . Z wykresu można odczytać, iż wraz ze wzrostem parametru τ_{dop} rośnie oczekiwana liczba obiektów zasilających okresowo system

odzysku. Niezależnie od wartości parametru λ , liczba obiektów wchodzących do systemu odzysku dąży do wartości granicznej, którą jest wartość średnia liczby obiektów wprowadzanych do systemu eksploatacji. Obiekty charakteryzujące się wysoką intensywnością uszkodzeń szybciej osiągną wartość graniczną. Istotna różnica w liczbie obiektów zasilających okresowo system odzysku, w zależności od wartości parametru określającego intensywność uszkodzeń, jest dla małych wartości τ_{dop} .



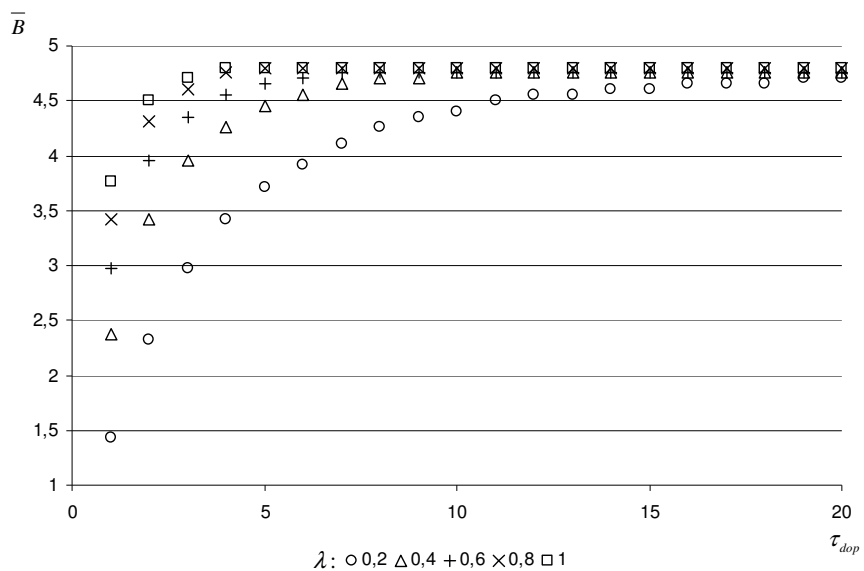
Rys. 4.23. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Wzrost wartości parametru τ_{dop} zwiększa liczbę obiektów technicznych znajdujących się w systemie odzysku. Prowadzi to do zwiększenia oczekiwanej liczby uruchomień procesu odzysku. Zwiększenie liczby uruchomień procesu odzysku prowadzi do zmniejszenia liczby uruchomień produkcji, co pokazano na wykresie 4.24.



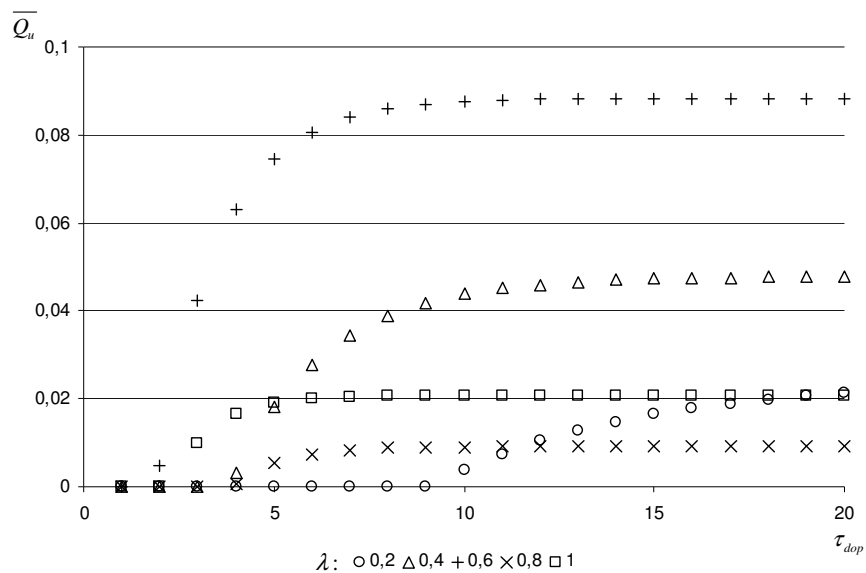
Rys. 4.24. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zwiększona liczba uruchomień procesu odzysku, przy założonych wartościach parametrów wejściowych ($Q_{odz} = 5$), prowadzi również do zmniejszenia poziomu obsługi systemu eksploatacji oraz wzrostu wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania (rys. 4.25).



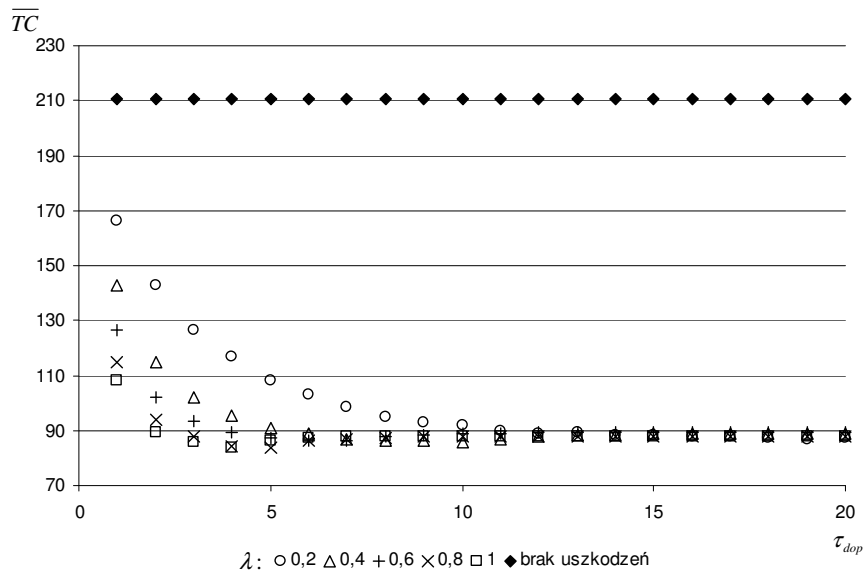
Rys. 4.25. Zmienność wartości średniej wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Wzrost liczby obiektów zasilających system odzysku prowadzi do przekroczenia poziomu wyznaczającego maksymalny stan zapasu w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji ($s_u = 10$). Na rysunku 4.26 pokazano wpływ zwiększania wartości parametru τ_{dop} , na oczekiwaną liczbę unieszkodliwionych obiektów. Największą liczbę unieszkodliwionych obiektów zaobserwowano dla $\lambda = 0,6$.

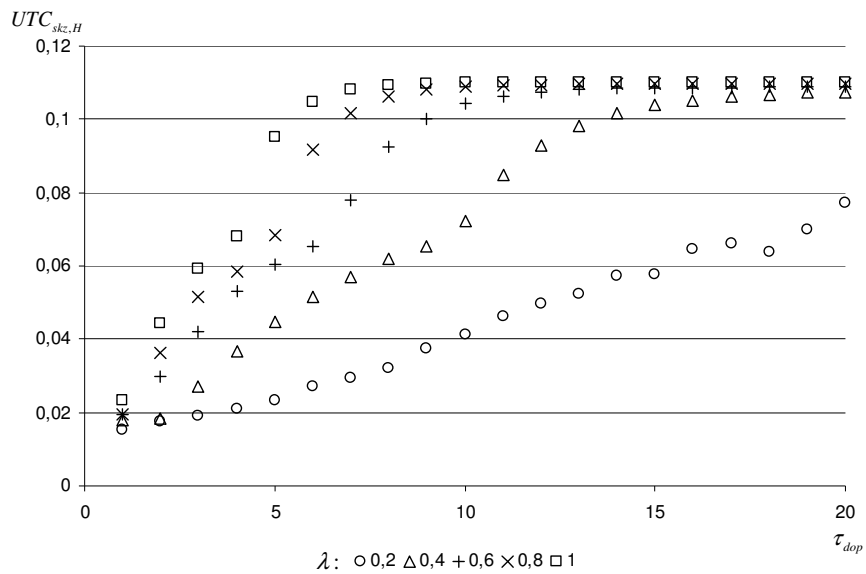


Rys. 4.26. Zmienność wartości średniej liczby obiektów poddanych unieszkodliwieniu, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zmiana parametru τ_{dop} ma istotne znaczenie w analizie oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu. Zależność pomiędzy zmianą wartości τ_{dop} , a wielkością oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu przedstawia wykres 4.27. W przypadku systemu odzysku wzrost wartości parametru τ_{dop} powoduje znaczne obniżenie łącznych kosztów. Najniższe koszty funkcjonowania systemu występują dla obiektów charakteryzujących się dużą intensywnością uszkodzeń i rosną wraz ze zmniejszaniem wartości parametru λ . Niestety, jak zauważono wcześniej, wzrost wartości parametru τ_{dop} , przy założonych parametrach wejściowych, powoduje zmniejszenie poziomu obsługi systemu eksploatacji.



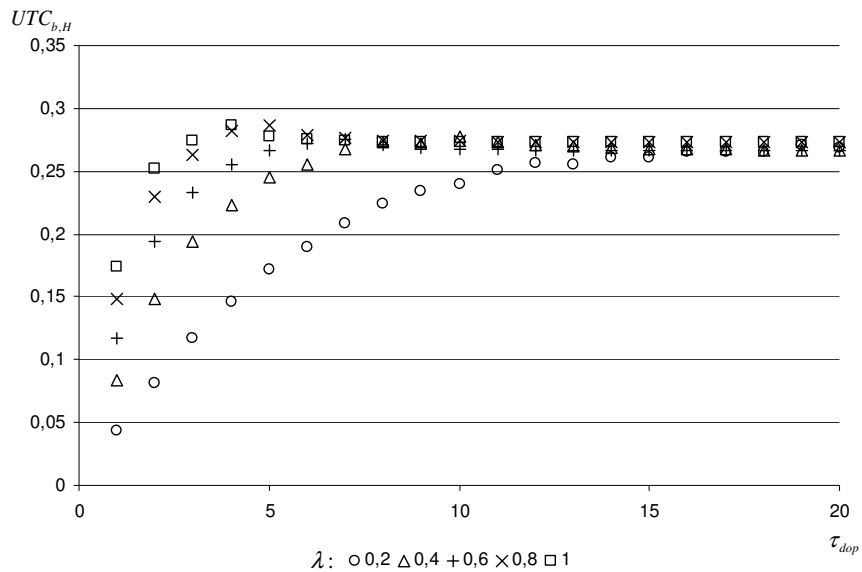
Rys. 4.27. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ



Rys. 4.28. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów składowania zwrotów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Wraz ze wzrostem wartości parametru τ_{dop} maleje udział kosztów produkcji, a rośnie kosztów odzysku. Zwiększanie liczby obiektów okresowo zasilających system powoduje zwiększenie udziału kosztów składowania zwrotów (rys. 4.28), ale nie wpływa znacząco na udział łącznych kosztów składowania nowych wyrobów. Wraz ze wzrostem wartości τ_{dop} rośnie

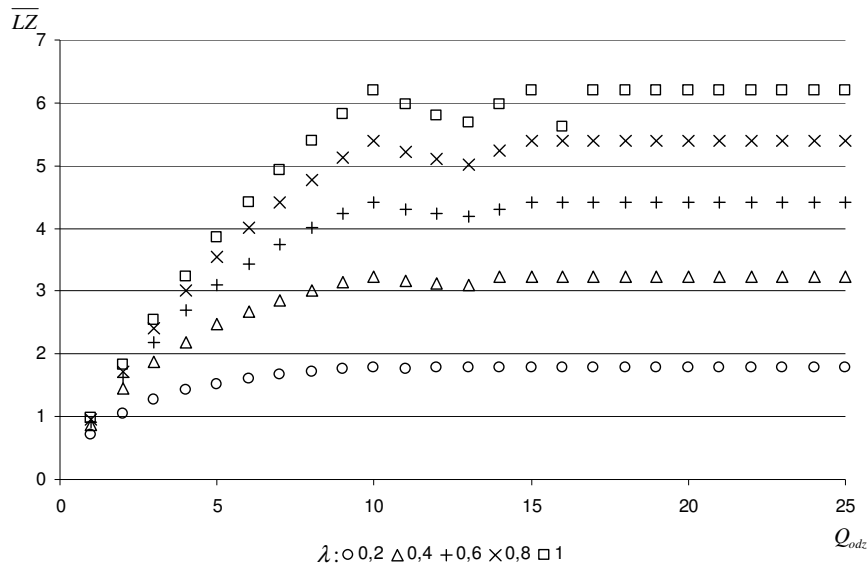
udział kosztów unieszkodliwienia oraz kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania (rys. 4.29).



Rys. 4.29. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop} , dla poszczególnych wartości parametru λ

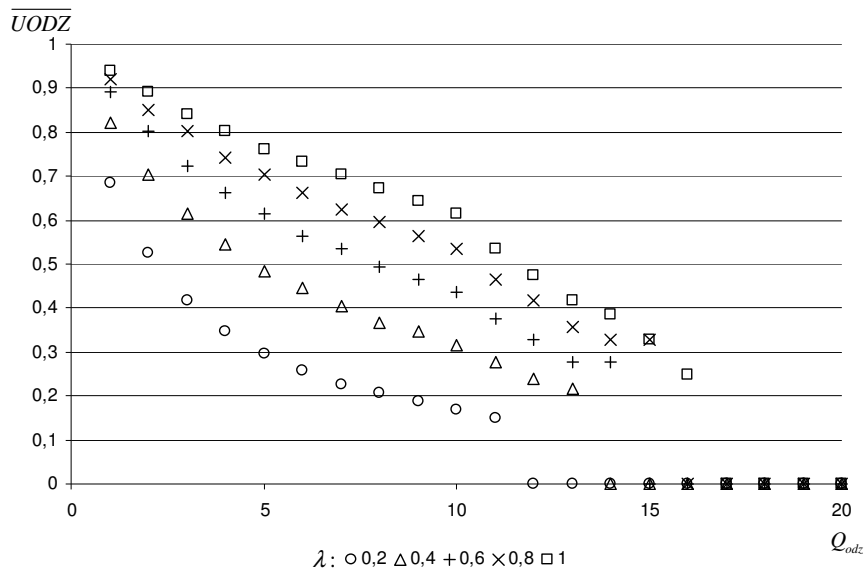
4.2.3. Wielkość partii odzysku

Kolejnym parametrem wejściowym analizowanego modelu jest wielkość partii odzysku. Parametr ten, w założonej polityce utrzymania zapasów, ma szczególnie istotne znaczenie. Odpowiada za wielkość zapasu znajdującego się w magazynie zwrotów oraz za chwile uruchamiania procesu odzysku. Na wykresie 4.30 pokazano wpływ zmiany wielkości partii odzysku na oczekiwaną liczbę obiektów zwracanych do systemu. Można zauważyć, że zwiększanie partii odzysku prowadzi do wzrostu liczby tych obiektów. Dla dużych wartości parametru Q_{odz} liczba zwrotów stabilizuje się na pewnym poziomie, zależnym od intensywności uszkodzeń obiektów technicznych.

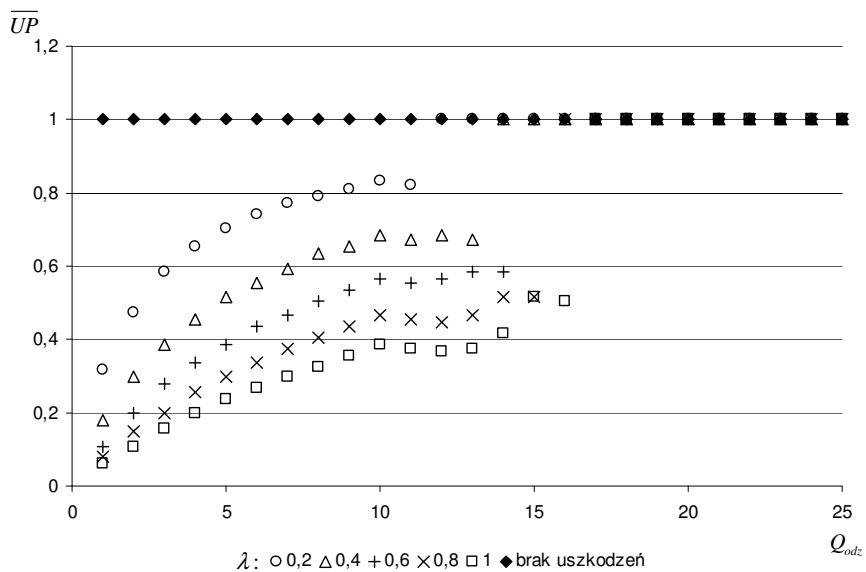


Rys. 4.30. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

W stosowanej polityce uzupełniania zapasów proces odzysku może zostać uruchomiony tylko wówczas, gdy liczba obiektów, znajdujących się w magazynie zwrotów, jest większa bądź równa wielkości partii odzysku. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych wzrastająca wielkość partii odzysku zaczyna przekraczać maksymalną pojemność magazynu zwrotów określoną przez wielkość poziomu unieszkodliwiania s_u . Dla dużych wartości Q_{odz} oczekiwana liczba obiektów znajdujących się w magazynie zwrotów dąży do wartości granicznej wyznaczonej wartością parametru s_u . W przypadku obiektów o intensywności uszkodzeń $\lambda = 0,2$, dla których oczekiwana liczba obiektów okresowo zasilających system odzysku jest mniejsza niż dwie sztuki, uruchomienie partii odzysku staje się niemożliwe już dla $Q_{odz} = 12$. Zwiększenie partii odzysku skutkuje zatem zmniejszeniem oczekiwanej liczby uruchomień procesu odzysku oraz zwiększeniem liczby uruchomień produkcji. Prowadzi również do zwiększenia liczby obiektów poddawanych unieszkodliwieniu oraz pojawiania się okresów, w których nie są realizowane procesy odzysku ani produkcji, a zapotrzebowanie jest pokrywane zapasem przechowywanym w magazynie wyrobów finalnych. Wpływ zmiany wielkości partii odzysku na średnią liczbę uruchomień procesu produkcji oraz odzysku pokazano na wykresach 4.31 - 4.32.

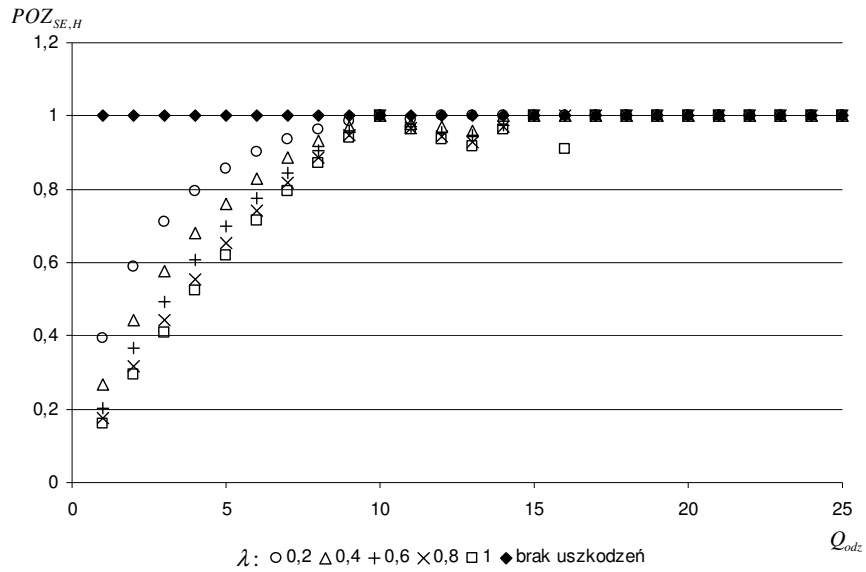


Rys. 4.31. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ



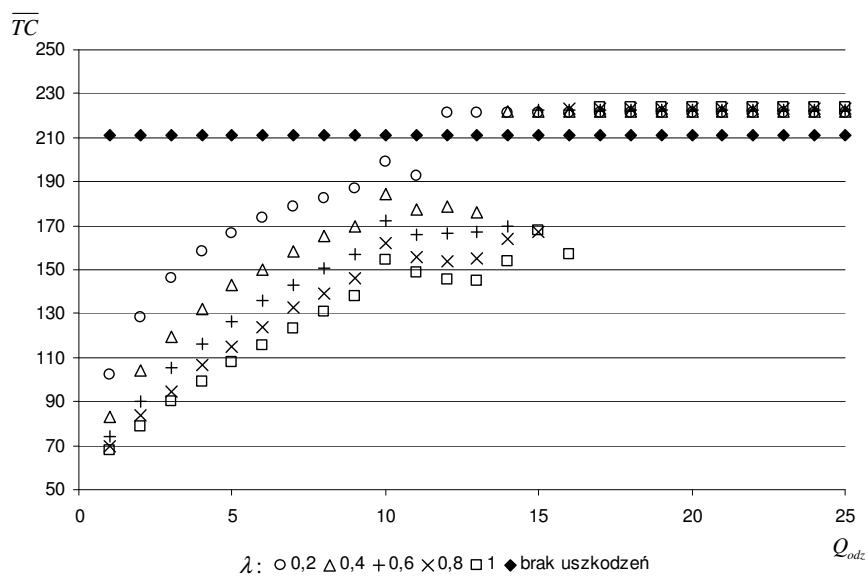
Rys. 4.32. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zwiększanie udziału procesów produkcyjnych prowadzi, przez zmniejszenie niezrealizowanego zapotrzebowania, do wzrostu wskaźnika określającego poziom obsługi systemu eksploatacji. Wpływ zmiany wartości parametru Q_{odz} na poziom obsługi pokazano na rysunku 4.33.



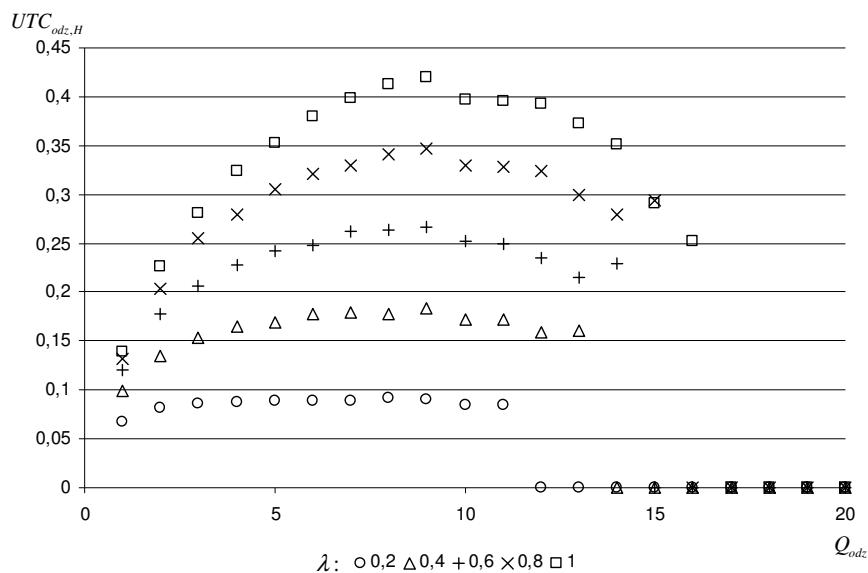
Rys. 4.33. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zmiana wielkości partii odzysku wpływa również na wartość oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu odzysku (rys. 4.34). Dla dużych wartości Q_{odz} koszty działania systemu odzysku przekraczają koszty ponoszone przez system z brakiem uszkodzeń. Spowodowane jest to pojawieniem się kosztów unieszkodliwiania. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych, dla dużych wartości Q_{odz} (zależnie od parametru λ), system odzysku zaspokaja zapotrzebowanie tak, jak system z brakiem uszkodzeń i dodatkowo ponosi koszty składowania i unieszkodliwiania zwrotów.

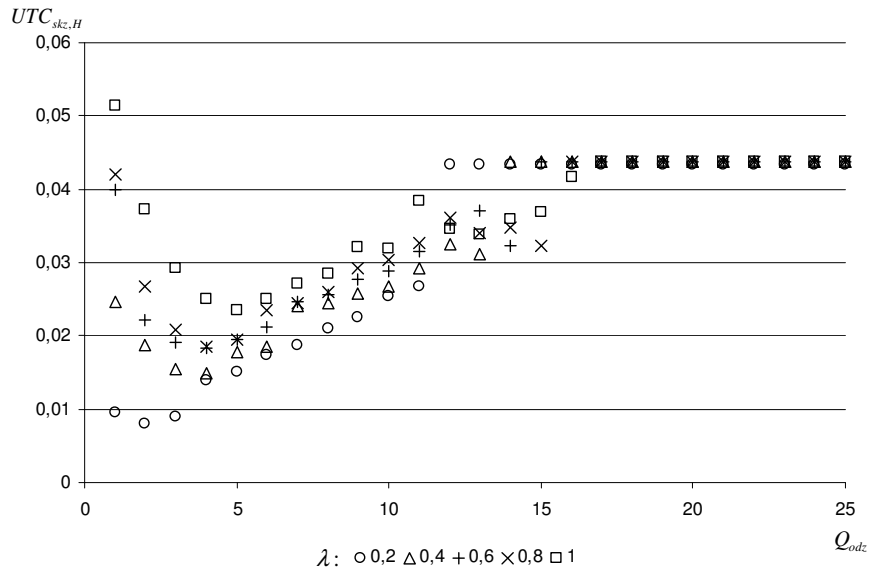


Rys. 4.34. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

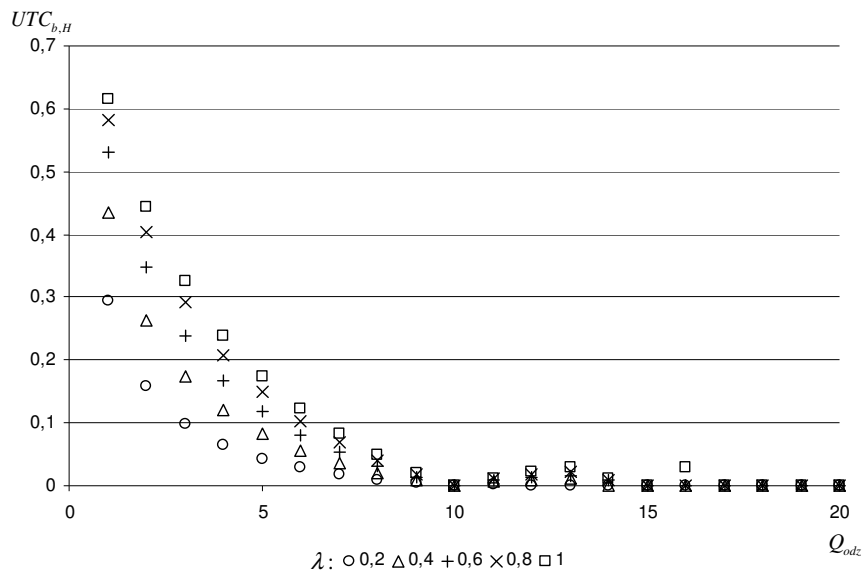
Zmiana wielkości partii odzysku wywiera również istotny wpływ na składowe oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu. Zwiększanie Q_{odz} powoduje początkowo wzrost a później spadek do zera udziału oczekiwanych kosztów odzysku (rys. 4.35). Wzrasta udział kosztów produkcji oraz składowania nowych produktów. Wzrost liczby obiektów zasilających system połączony z realizacją procesów odzysku powoduje spadek udziału kosztów składowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Przerwanie realizacji procesów odzyskiwania wartości, dla dużych wartości Q_{odz} (przy założonym s_u), prowadzi do wzrostu udziału kosztów składowania (rys. 4.36). W analogiczny sposób można tłumaczyć zmianę kosztów unieszkodliwienia. Zwiększenie wartości Q_{odz} prowadzi również do zmniejszenia udziału oczekiwanych kosztów braku w zapasie (rys. 4.37).



Rys. 4.35. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu odzysku, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ



Rys. 4.36. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów składowania zwrotów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

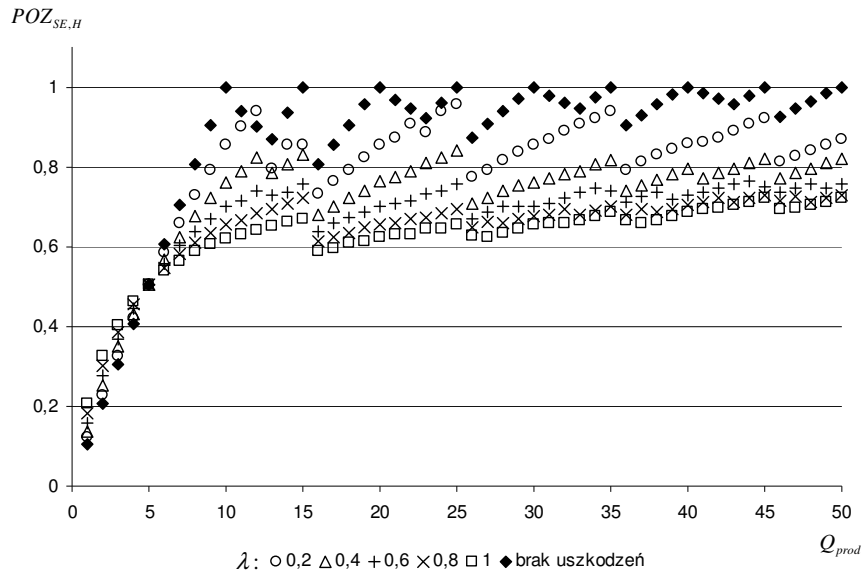


Rys. 4.37. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

4.2.4. Wielkość partii produkcyjnej

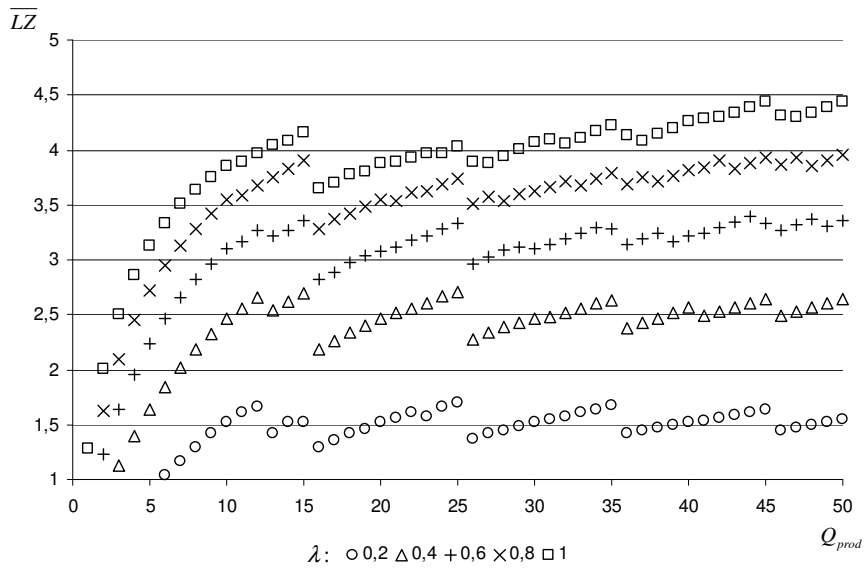
Na uwagę zasługuje również analiza wpływu zmiany wielkości partii produkcyjnej, na wartość parametrów wyjściowych modelowanego systemu wsparcia logistycznego.

Na wykresie 4.38 pokazano wpływ zmiany parametru Q_{prod} na wartość wskaźnika określającego poziom obsługi systemu eksploatacji. Zwiększenie partii produkcyjnej sprawia, że zmniejsza się wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania, a więc wzrasta liczba obiektów znajdujących się w systemie eksploatacji.



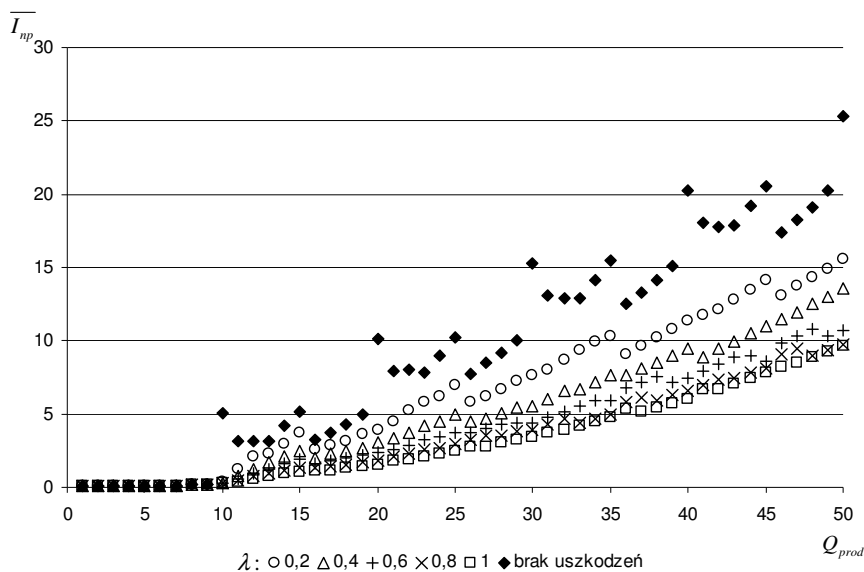
Rys. 4.38. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Im więcej obiektów technicznych pracuje w systemie eksploatacji, tym większa jest oczekiwana liczba obiektów wycofywanych z tego systemu, które zasilają analizowany system odzysku (rys. 4.39). Zgodnie z wykresem przedstawiającym tę zależność, zwiększanie partii produkcyjnej sprawia, że liczba obiektów wchodzących do systemu odzysku rośnie.



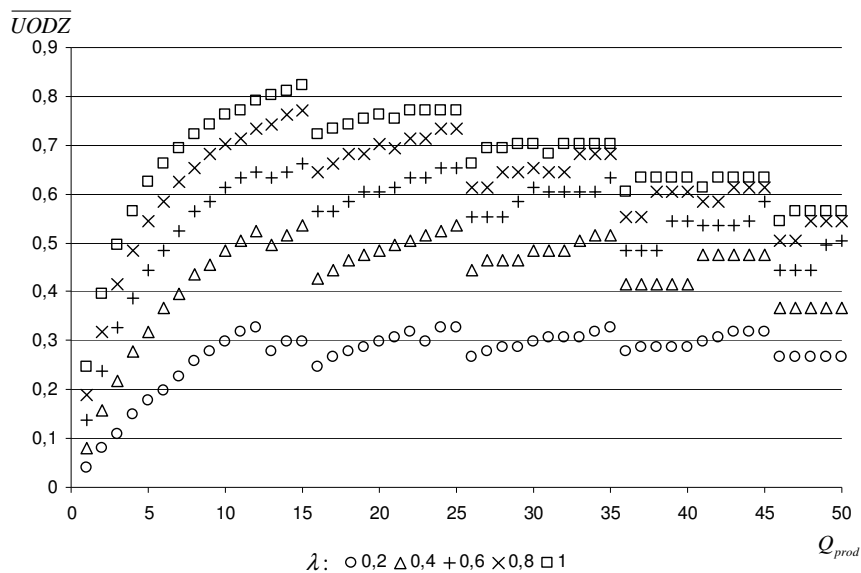
Rys. 4.39. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zwiększająca się wielkość partii produkcyjnej prowadzi do wzrostu oczekiwanej liczby obiektów znajdujących się w magazynie wyrobów finalnych (rys. 4.40). Okresowe zmniejszanie liczby składowanych obiektów w systemie, z brakiem uszkodzeń, jest związane z różnicą pomiędzy wielkością partii produkcyjnej, a wielkością zapotrzebowania. W systemie odzysku różnica ta ma mniejszy wpływ na wartość oczekiwaną, ze względu na okresowe uruchomienia partii odzysku.

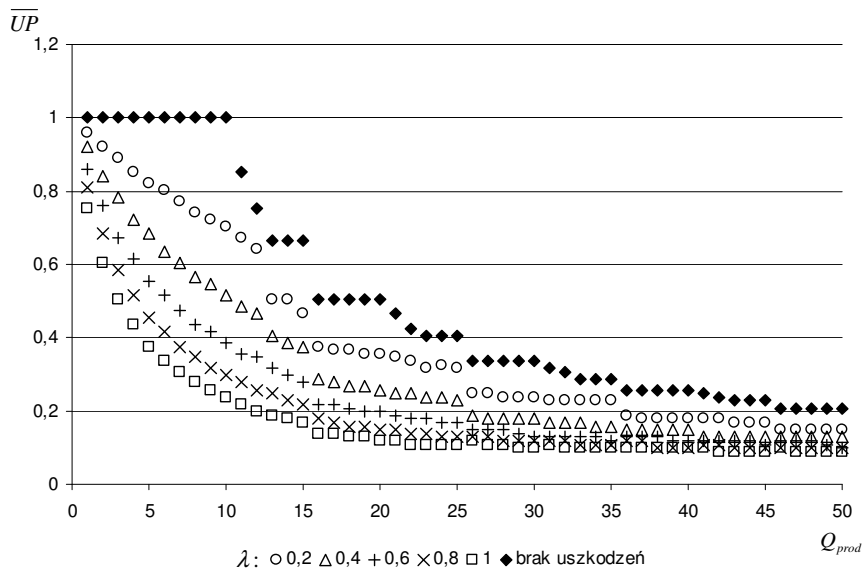


Rys. 4.40. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Zwiększający się poziom zapasu utrzymywanego w magazynie wyrobów finalnych prowadzi do wzrostu liczby okresów, w których zapotrzebowanie pokrywane jest wyłącznie z zapasów. Na wykresach 4.41 - 4.42 pokazano wpływ wzrostu wartości parametru Q_{prod} na realizację procesów odzysku oraz produkcji. Zwiększanie wielkości partii produkcyjnej prowadzi początkowo do wzrostu liczby okresowych uruchomień odzysku. Najwięcej uruchomień procesu odzysku zaobserwowano dla obiektów z dużą intensywnością uszkodzeń. Dla dużych wartości Q_{prod} liczba uruchomień procesu odzysku stopniowo się zmniejsza. Wzrost Q_{prod} prowadzi również do obniżenia oczekiwanej liczby uruchomień produkcji oraz do wzrostu liczby unieszkodliwianych produktów.

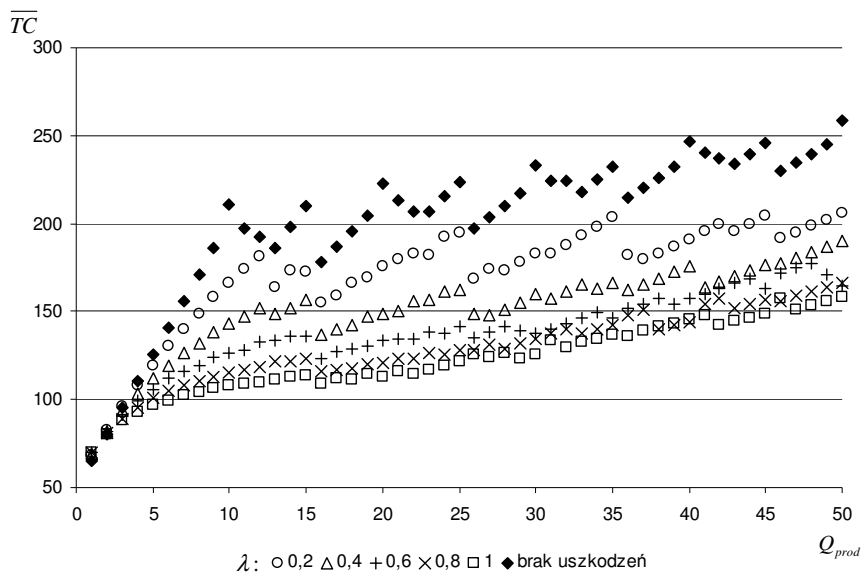


Rys. 4.41. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ



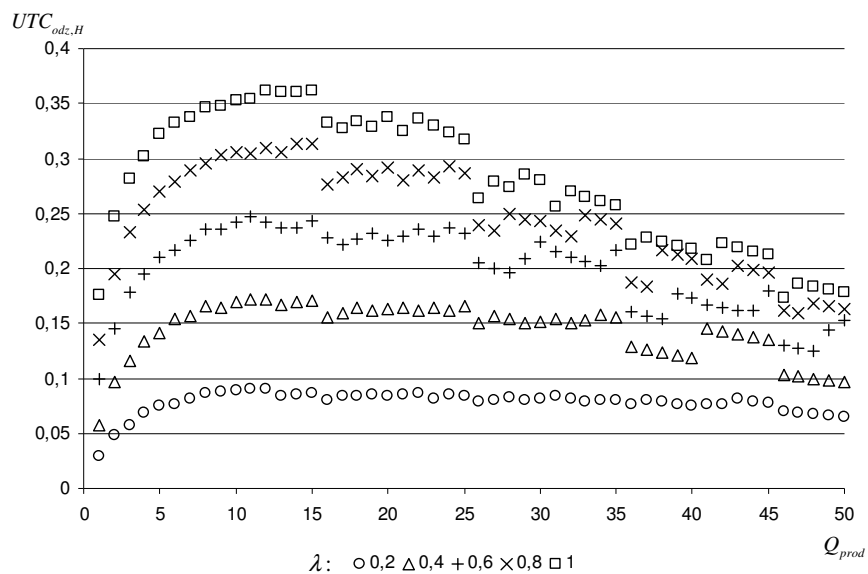
Rys. 4.42. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

W kolejnym kroku analizie poddano wpływ zmiany wielkości partii produkcyjnej na całkowite koszty funkcjonowania systemu. Zależność tą przedstawia wykres 4.43. Oczekiwana wartość łącznych kosztów działania systemu rośnie wraz ze wzrostem wartości parametru Q_{prod} , zarówno dla systemu z brakiem uszkodzeń, jak i dla systemu odzysku. W zakresie zmiany parametru Q_{prod} można zaobserwować lokalne zmniejszenia oczekiwanych kosztów, ale występują one jednocześnie z obniżeniem poziomu obsługi systemu eksploatacji.

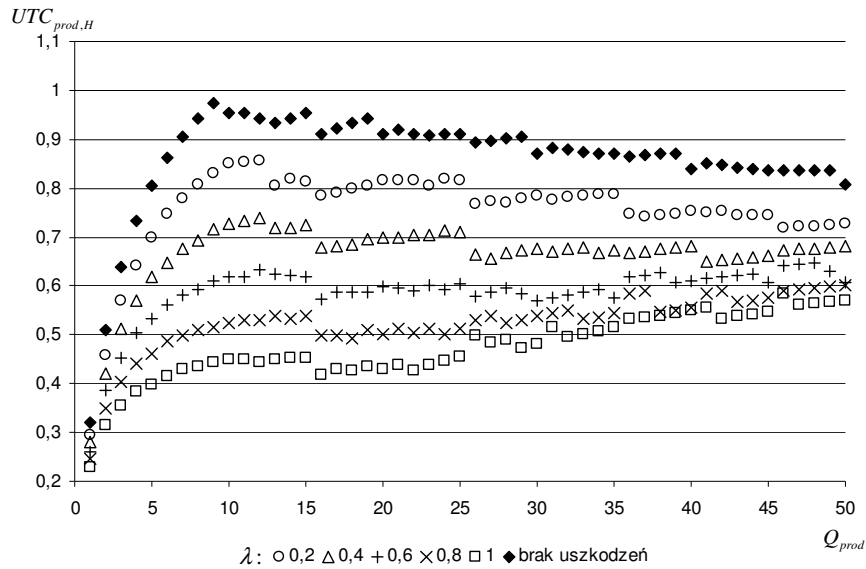


Rys. 4.43. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Na rysunkach 4.44 oraz 4.45 pokazano zmianę udziału kosztów odzysku oraz produkcji spowodowaną wzrostem wielkości partii produkcyjnej. Udział kosztów odzysku rośnie dla wszystkich obiektów w obszarze małych wartości Q_{prod} , a dla dużych spada. Największy spadek można zaobserwować dla obiektów charakteryzujących się wysoką intensywnością uszkodzeń. Dla obiektów z małą intensywnością uszkodzeń spadek jest nieznaczny. Zwiększanie partii produkcyjnej wpływa również na zmniejszenie udziału kosztów braku w zapasie. Zwiększają się również koszty związane z unieszkodliwianiem nadmiaru obiektów znajdujących się w magazynie zwrotów.



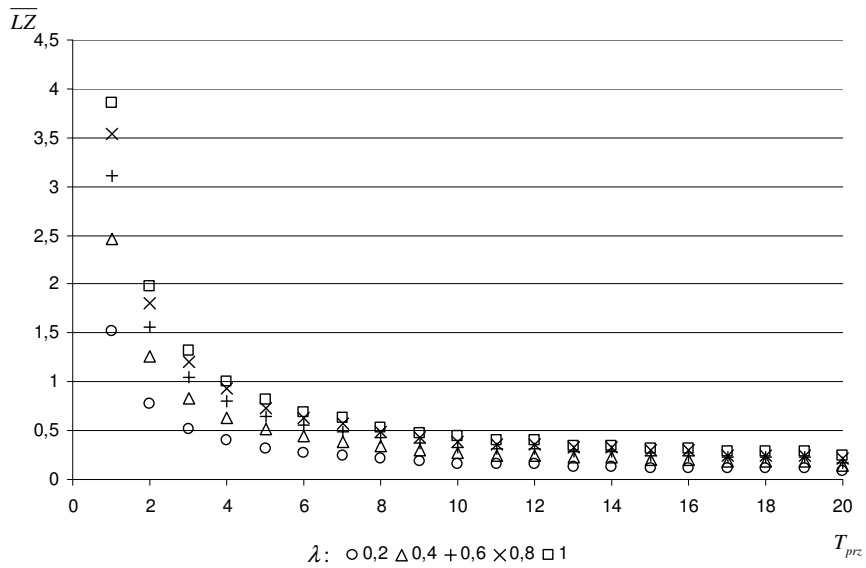
Rys. 4.44. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu odzysku, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ



Rys. 4.45. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu produkcji, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{prod} , dla poszczególnych wartości parametru λ

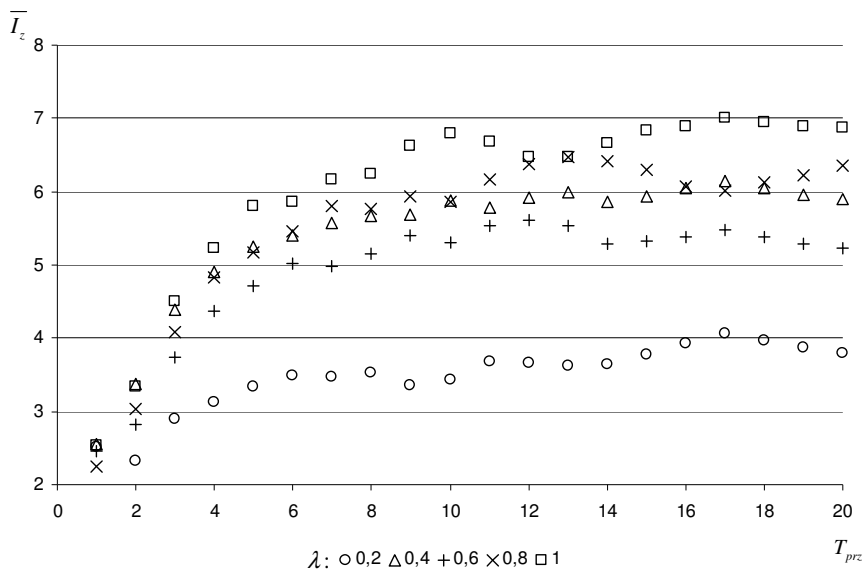
4.2.5. Czas przeglądu

Kolejnym parametrem, którego wpływ na uzyskane wyniki analityczne modelu wsparcia logistycznego przeanalizowano, jest długość okresu przeglądu poziomu zapasu. Na wykresie 4.46 przedstawiono wpływ zmiany parametru długości okresu przeglądu T_{prz} , na oczekiwaną liczbę obiektów zasilających system odzysku. Przy ustalonych wartościach parametrów wejściowych analizowanego modelu ($\tau_{dop} = 1$), wydłużenie okresu przeglądu przekłada się na zmniejszenie liczby obiektów, które po wycofaniu z eksploatacji są zwracane do systemu odzysku.



Rys. 4.46. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru T_{prz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

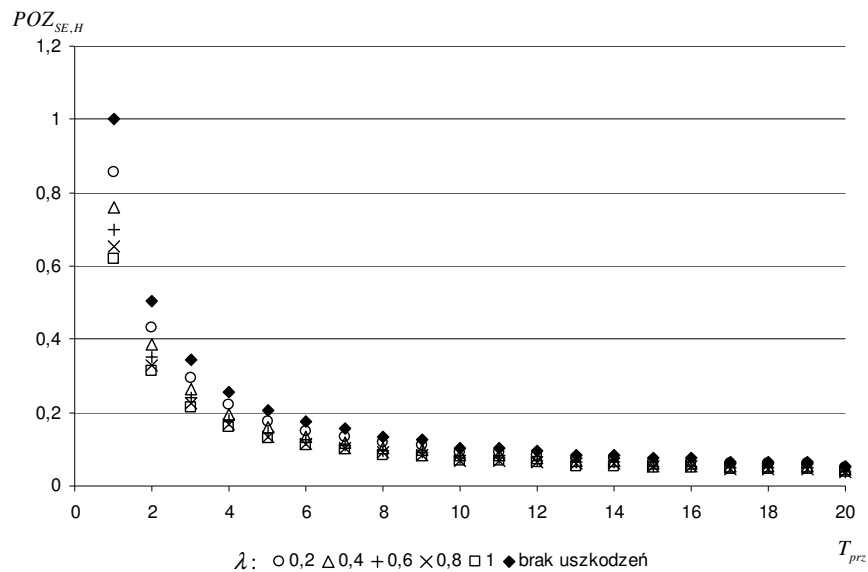
Zwiększenie wartości parametru T_{prz} powoduje wzrost wielkości zapasu w magazynie obiektów oczekujących na odzysk (rys. 4.47).



Rys. 4.47. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru T_{prz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

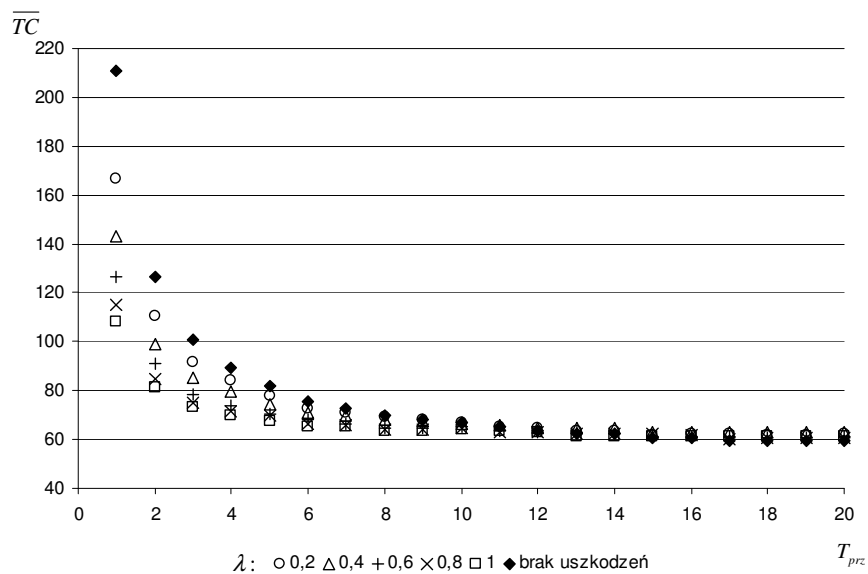
Przy założonych wartościach parametrów wejściowych, wydłużenie okresu przeglądu skutkuje zmniejszeniem wielkości zrealizowanego zapotrzebowania. Prowadzi to do obniżenia poziomu obsługi systemu eksploatacji (definiowanego stosunkiem zapotrzebowania

zrealizowanego do zapotrzebowania zgłoszonego). Opisaną relację przedstawiono na wykresie 4.48.



Rys. 4.48. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji, w funkcji zmiany parametru T_{prz} , dla poszczególnych wartości parametru λ

Wydłużenie okresu przeglądu prowadzi do obniżenia oczekiwanych kosztów funkcjonowania systemu (rys. 4.49), jednakże wiąże się to wyłącznie ze zmniejszeniem liczby uruchomień procesów odzysku, produkcji i unieszkodliwiania. Znaczny wzrost niezrealizowanego zapotrzebowania, w rezultacie przekłada się na zwiększenie udziału kosztów wystąpienia braków w zapasie.



Rys. 4.49. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu w funkcji zmiany parametru T_{prz} dla poszczególnych wartości parametru λ

5. SYMULACYJNY MODEL SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO PROCESU ZAGOSPODAROWANIA OBIEKTÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI

Podczas analizy wrażliwości modelu analitycznego przyjęto założenia upraszczające proces obliczeniowy. Założono, że wielkość zapotrzebowania zgłaszanego okresowo przez system eksploatacji jest stała oraz, że czas poprawnej pracy obiektów w systemie eksploatacji jest opisany rozkładem wykładniczym. Takie założenia znacznie ograniczają możliwość praktycznego wykorzystania opracowanego modelu. W związku z tym, w celu przeprowadzenia analiz w środowisku bardziej zbliżonym do rzeczywistego, wykorzystano narzędzie symulacji komputerowej metodą *Monte Carlo*. System logistyczny wspierający proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji został zamodelowany przy wykorzystaniu oprogramowania *MATLAB ver. 7.30.267 (R2006b)* firmy *The Mathworks* [169].

Zakres zmienności parametrów wejściowych, w analizie wrażliwości modelu symulacyjnego został dobrany, w oparciu o wstępną analizę wpływu tych parametrów na wyniki modelu. W tabeli 5.1 zamieszczono zestawienie analizowanych parametrów wejściowych.

W modelu symulacyjnym przyjęto, że wielkość zapotrzebowania D_T zgłaszanego okresowo przez system eksploatacji jest opisana rozkładem Poissona. Przyjęto następującą postać dystrybuanty rozkładu Poissona:

$$F(t) = \exp(-\lambda_D) \sum_{i=0}^{|t|} \frac{\lambda_D^i}{i!}, \quad (5.1)$$

gdzie:

λ_D - parametr rozkładu Poissona określający wartość oczekiwaną wielkości zapotrzebowania, zgłaszanego okresowo przez system eksploatacji.

Podczas generowania liczb z rozkładu Poissona wykorzystano funkcję *poissrnd*. Funkcja ta zwraca tablicę zawierającą liczby z rozkładu Poissona opisanego parametrem λ_D . W procesie generowania liczb losowych funkcja *poissrnd* wykorzystuje metody opisane w pracy [16].

W modelu symulacyjnym założono, że czas do uszkodzenia obiektów pracujących w systemie eksploatacji jest opisany rozkładem Weibulla. Przyjęto następującą postać dystrybuanty rozkładu Weibulla:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_r}\right)^{\beta_r}\right) \text{ dla } t \in [0, \infty), \quad (5.2)$$

gdzie:

α_r - parametr skali rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu,

β_r - parametr kształtu rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu.

Podczas generowania czasów do uszkodzenia dla obiektów pracujących w systemie eksploatacji wykorzystano funkcję *wblrnd*. W opracowanym modelu symulacyjnym funkcja ta zwraca tablicę zawierającą losowe czasy do uszkodzenia obiektów technicznych opisane rozkładem Weibulla. W procesie generowania liczb losowych funkcja *wblrnd* wykorzystuje metodę odwracania dystrybuanty [140, 162, 169].

Tabela 5.1. Zakres zmienności parametrów wejściowych modelu symulacyjnego

Lp.	Oznaczenie	Wielkość wyjściowa	Zakres Zmienności (min:skok:max)	Objaśnienie
1	λ_D	1000	brak	parametr rozkładu Poissona określający wartość oczekiwaną wielkości zapotrzebowania, zgłaszanego przez system eksploatacji
2	α_r	40	1:4:117	parametr skali rozkładu opisującego czas do uszkodzenia obiektu technicznego pracującego w systemie eksploatacji
3	β_r	1,5	0,5:0,5:15	parametr kształtu rozkładu opisującego czas do uszkodzenia obiektu technicznego pracującego w systemie eksploatacji
4	H	2001	brak	długość analizowanego horyzontu planowania
5	τ_{dop}	25	1:3:88	dopuszczalny czas do uszkodzenia
6	Q_{prod}	3000	250:250:7500	wielkość partii produkcyjnej

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wielkość wyjściowa</i>	<i>Zakres Zmienności (min:skok:max)</i>	<i>Objaśnienie</i>
7	Q_{odz}	2000	100:100:3000	wielkość partii odzysku
8	s	0	0:100:2900	poziom informacyjny zapasu wyrobów finalnych informuje o konieczności uzupełnienia zapasu
9	s_u	2000	0:250:7250	poziom informacyjny zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji – informuje o konieczności uruchomienia procesu unieszkodliwiania
10	T_{prz}	1	1:1:30	okres przeglądu
11	k_{sknp}	2	0:1:29	stały jednostkowy koszt utrzymania zapasu nowych obiektów
12	k_{skz}	1	0:1:29	stały jednostkowy koszt utrzymania zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji
13	k_{prod}	20	0:1:29	stały jednostkowy koszt wytworzenia nowych obiektów
14	k_{odz}	10	0:1:29	stały jednostkowy koszt odzysku uszkodzonych obiektów
15	k_u	0,5	0:1:29	stały jednostkowy koszt unieszkodliwiania uszkodzonych obiektów
16	k_b	5	0:1:29	stały jednostkowy koszt kary finansowej, związany z wystąpieniem braku w zapasie wyrobów finalnych

W trakcie realizacji badania proces symulacji powtarzano wielokrotnie, w celu uniezależnienia otrzymanych wartości parametrów wyjściowych modelu, od pojedynczej realizacji eksperymentu. Końcowym wynikiem jest uśredniona wartość parametrów

wyjściowych uzyskanych podczas każdej z przeprowadzonych symulacji. Parametry wyjściowe modelu przedstawia tabela 5.2.

Tabela 5.2. Parametry wyjściowe modelu symulacyjnego gromadzone podczas analizy wrażliwości modelu wsparcia logistycznego

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Sposób wyznaczenia wyniku</i>	<i>Objaśnienie</i>
1	$POZ_{SE,H}$	$= \frac{\sum_{T=1}^H (D_{zr,T})}{\sum_{T=1}^H D_T}$	poziom obsługi systemu eksploatacji w analizowanym horyzoncie planowania H
2	$D_{zr,T}$	$= \begin{cases} I_{np,T-1} & \text{dla } (I_{np,T-1} - D_T) < 0 \\ D_T & \text{dla } (I_{np,T-1} - D_T) \geq 0 \end{cases}$	wielkość zapotrzebowania zrealizowanego w okresie T
3	\overline{LZ}	$= \frac{\sum_{T=1}^H PN_{[t_{T-1}, t_T]}}{H}$	średnia liczba obiektów, które zasiły system odzysku w analizowanym horyzoncie czasu H
4	$PN_{[t_{T-1}, t_T]}$	$= PN_{1,[t_{T-1}, t_T]} + PN_{2,[t_{T-1}, t_T]}$	liczba obiektów zasilających system odzysku w przedziale czasu $[t_{i-1}, t_i)$ dla $\tau_{dop} > 1$
5	$PN_{1,[t_{T-1}, t_T]}$	$= \sum_{t_e = \max(t_{T-1} - \lceil \tau_{dop} \rceil, 0)}^{t_T - \lceil \tau_{dop} \rceil} \left(\sum (t_{T-1} - t_e \leq \tau_{t_e} < \tau_{dop}) \right)$	suma z sumy przypadków, gdy czas do uszkodzenia τ_{t_e} obiektów wprowadzonych do systemu eksploatacji w chwili t_e spełnia wskazany warunek
6	$PN_{2,[t_{T-1}, t_T]}$	$= \sum_{t_e = t_T - \lceil \tau_{dop} \rceil + 1}^{t_{T-1}} \left(\sum (t_{T-1} - t_e \leq \tau_{t_e} < t_T - t_e) \right)$	suma z sumy przypadków, gdy czas do uszkodzenia τ_{t_e} obiektów wprowadzonych do systemu eksploatacji w chwili t_e spełnia wskazany warunek
7	$PN_{[t_{T-1}, t_T]}$	$= PN_{1,[t_{T-1}, t_T]}$	liczba obiektów zasilających system odzysku w przedziale czasu $[t_{i-1}, t_i)$ dla $\lceil \tau_{dop} \rceil \leq 1$

Lp.	Oznaczenie	Sposób wyznaczenia wyniku	Objaśnienie
8	$PN_{1,[t_{T-1},t_T]}$	$= \sum_{t_e=\max(t_{T-1}-\lfloor \tau_{dop} \rfloor, 0)}^{t_{T-1}} \left(\sum (t_{T-1} - t_e \leq \tau_{t_e} < \tau_{dop}) \right)$	suma z sumy przypadków, gdy czas do uszkodzenia τ_{t_e} obiektów wprowadzonych do systemu eksploatacji w chwili t_e spełnia wskazany warunek
9	\bar{I}_z	$= \frac{\sum_{T=1}^H I_{z,T}}{H}$	średni poziom zapasu w magazynie obiektów oczekujących na odzysk
10	\bar{I}_{np}	$= \frac{\sum_{T=1}^H I_{np,T}}{H}$	średni poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych
11	\bar{B}	$= \frac{\sum_{T=1}^H B_T}{H}$	średnia wielkość braku w zapasie, w magazynie wyrobów finalnych
12	\bar{UP}	$= \frac{1 + \sum_{T=2}^H UP_T}{H}$	średnia liczba uruchomień procesu produkcyjnego, przy założeniu, że w pierwszym okresie zawsze uruchamiana jest produkcja
13	UP_T	$= \begin{cases} 1 & \text{gdy } \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) = 0 \\ \text{oraz} \\ I_{np,T-1} - D_T \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1},t_T]} < Q_{odz} \end{cases} \\ 0 & \text{gdy } \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) \neq 0 \\ \text{lub} \\ I_{np,T-1} - D_T > s \\ \text{lub} \\ I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1},t_T]} \geq Q_{odz} \end{cases} \end{cases}$	liczba uruchomień procesu produkcyjnego w okresie $T > 1$
14	\overline{UODZ}	$= \frac{\sum_{T=2}^H UODZ_T}{H}$	średnia liczba uruchomień procesu odzysku, przy założeniu, że w pierwszym okresie zawsze uruchamiana jest produkcja

Lp.	Oznaczenie	Sposób wyznaczenia wyniku	Objaśnienie
15	$UODZ_T$	$= \begin{cases} 1 \text{ gdy } \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) = 0 \\ \text{oraz} \\ I_{np,T-1} - D_t \leq s \\ \text{oraz} \\ I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} \geq Q_{odz} \end{cases} \\ 0 \text{ gdy } \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) \neq 0 \\ \text{lub} \\ I_{np,T-1} - D_T > s \\ \text{lub} \\ I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} < Q_{odz} \end{cases} \end{cases}$	liczba uruchomień procesu odzysku w okresie $T > 1$
16	$\overline{Q_u}$	$= \frac{\sum_{T=2}^H Q_{u,T}}{H}$	średnia liczba unieszkodliwianych obiektów, przy założeniu, że: $I_{z,1} = 0$, a więc $Q_{u,1} = 0$
17	$Q_{u,T}$	$= \begin{cases} I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T} - s_u \\ \text{gdy} \\ \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) = 0 \\ \text{oraz} \\ (I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T}) > s_u \end{cases} \\ 0 \text{ gdy } \begin{cases} rem((T-1), T_{prz}) \neq 0 \\ \text{lub} \\ (I_{z,T-1} + PN_{[t_{T-1}, t_T]} - Q_{odz,T}) \leq s_u \end{cases} \end{cases}$	wielkość partii w procesie unieszkodliwiania w okresie $T > 1$
18	\overline{TC}	$= \frac{\sum \begin{pmatrix} TC_{skz,H}, TC_{sknp,H}, \\ TC_{odz,H}, TC_{prod,H}, \\ TC_{b,H}, TC_{u,H} \end{pmatrix}}{H}$	całkowity koszt funkcjonowania systemu odzysku przypadający na jeden okres
19	$\overline{TC_{skz}}$	$= \frac{TC_{skz,H}}{H}$	całkowity koszt składowania obiektów wycofanych z eksploatacji przypadający na jeden okres

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Sposób wyznaczenia wyniku</i>	<i>Objaśnienie</i>
20	\overline{TC}_{sknp}	$= \frac{TC_{sknp,H}}{H}$	całkowity koszt składowania nowych obiektów przypadający na jeden okres
21	\overline{TC}_{odz}	$= \frac{TC_{odz,H}}{H}$	całkowity koszt odzysku uszkodzonych obiektów przypadający na jeden okres
22	\overline{TC}_{prod}	$= \frac{TC_{prod,H}}{H}$	całkowity koszt produkcji nowych obiektów przypadający na jeden okres
23	\overline{TC}_b	$= \frac{TC_{b,H}}{H}$	całkowity koszt braku w zapasie nowych obiektów przypadający na jeden okres
24	\overline{TC}_u	$= \frac{TC_{u,H}}{H}$	całkowity koszt unieszkodliwienia uszkodzonych obiektów przypadający na jeden okres
25	$UTC_{skz,H}$	$= \frac{\overline{TC}_{skz}}{TC}$	udział kosztów składowania uszkodzonych obiektów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku
26	$UTC_{sknp,H}$	$= \frac{\overline{TC}_{sknp}}{TC}$	udział kosztów składowania nowych obiektów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku
27	$UTC_{odz,H}$	$= \frac{\overline{TC}_{odz}}{TC}$	udział kosztów realizacji procesów odzysku uszkodzonych obiektów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku
28	$UTC_{prod,H}$	$= \frac{\overline{TC}_{prod}}{TC}$	udział kosztów realizacji procesów produkcji nowych obiektów w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku

<i>Lp.</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Sposób wyznaczenia wyniku</i>	<i>Objaśnienie</i>
29	$UTC_{b,H}$	$= \frac{\overline{TC_b}}{\overline{TC}}$	udział kosztów wystąpienia braku w zapasie nowych obiektów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku
30	$UTC_{u,H}$	$= \frac{\overline{TC_u}}{\overline{TC}}$	udział kosztów realizacji procesów unieszkodliwiania obiektów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku

5.1. Algorytm procesu symulacji

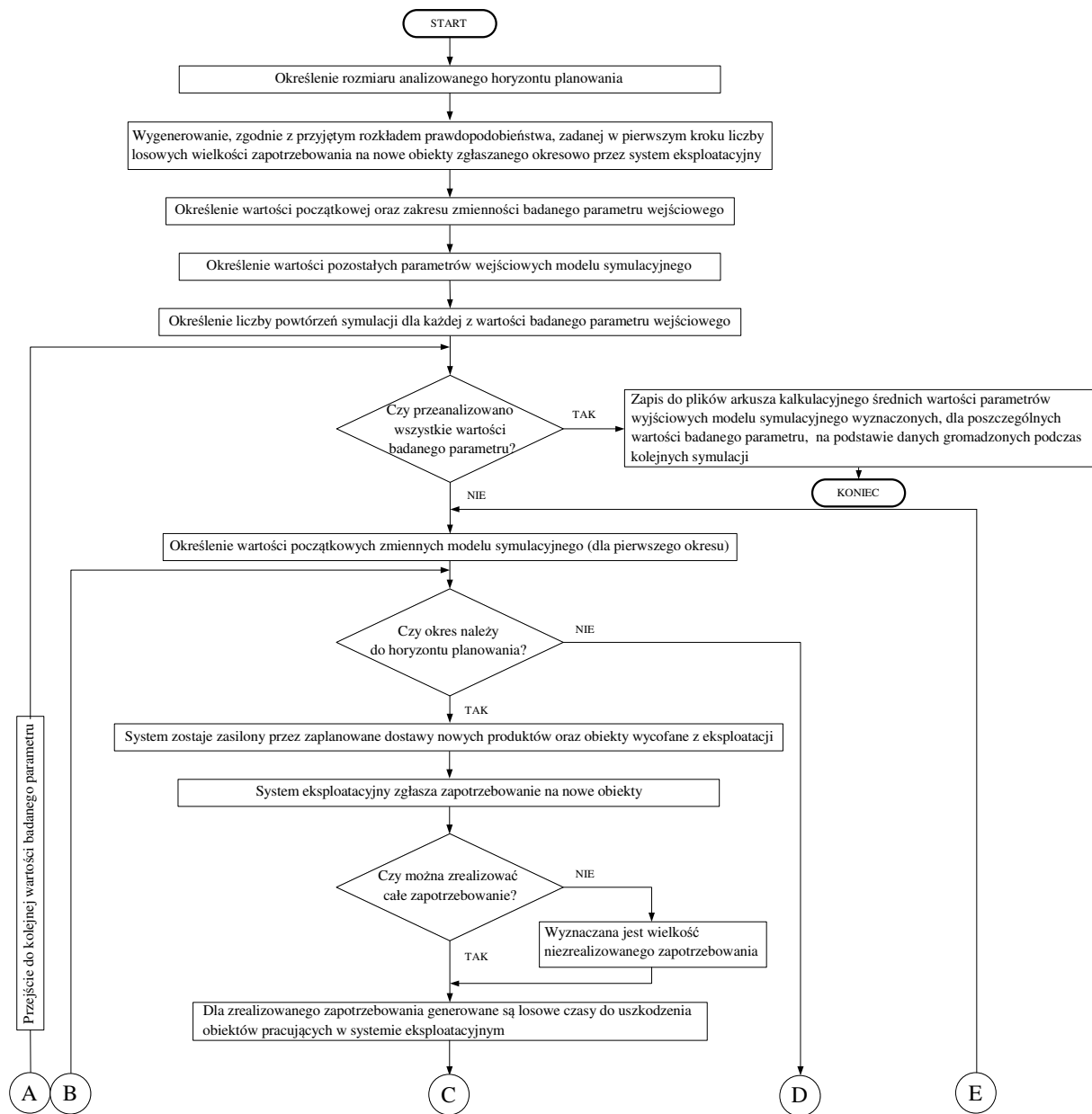
W opracowanym modelu symulacyjnym, wpływ czasu modelowany jest za pomocą stałych przyrostów. Każdy eksperyment symulacyjny ma określony horyzont planowania, wyrażony w liczbie okresów. Realizacja poszczególnych procesów, w kolejnych okresach, jest uzależniona od aktualnych wartości parametrów wejściowych oraz od decyzji podjętych w poprzednich okresach. W oparciu o założenia przyjęte podczas budowy modelu analitycznego opracowano następujący algorytm procesu symulacji:

1. W pierwszym kroku określany jest rozmiar analizowanego horyzontu czasu.
2. Generowana jest tablica zawierająca liczby losowe określające wielkość zapotrzebowania zgłaszanego przez system eksploatacji, w każdym z okresów. Zgodnie z założeniem wielkość zapotrzebowania opisana została rozkładem Poissona.
3. Dla każdego z badanych parametrów wejściowych określana jest wartość początkowa, skok oraz liczba badanych parametrów.
4. Określana jest liczba powtórzeń symulacji dla każdej z wartości badanego parametru wejściowego.
5. Definiowane są wartości początkowe zmiennych (dla pierwszego okresu) modelu symulacyjnego oraz parametry wejściowe.
6. Począwszy od drugiego okresu, przez określoną w pierwszym punkcie liczbę okresów, następuje powtórzenie działań opisanych w kolejnych podpunktach.
7. Sprawdzenie czy dany okres jest okresem przeglądu.
8. Sprawdzana jest możliwość zrealizowania całego zapotrzebowania zgłoszonego przez system eksploatacji.

9. Wyznaczana jest wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania.
10. Dla zrealizowanego zapotrzebowania generowane są losowe czasy do uszkodzeń. Wygenerowane czasy są umieszczane w macierzy, w wierszu, którego numer odpowiada numerowi okresu, w którym nastąpiło wprowadzenie obiektów do systemu eksploatacji. Zgodnie z założeniem, czasy do uszkodzenia obiektów pracujących w systemie eksploatacji są opisane rozkładem Weibulla.
11. W okresach przeglądu sprawdzany jest stan zapasu w magazynie wyrobów finalnych.
12. Jeżeli poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych spadnie do poziomu informacyjnego s uruchamiany jest proces odzysku albo produkcji.
13. Proces odzysku posiada wyższy priorytet, ale jest uruchamiany tylko wtedy, gdy w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji znajduje się wystarczająca liczba produktów do zrealizowania ustalonej partii odzysku Q_{odz} .
14. Magazyn obiektów oczekujących na odzysk jest zasilany w każdym okresie obiektami, które uszkodziły się pracując w systemie eksploatacji, w okresie poprzednim, a ich czas do uszkodzenia był krótszy, niż dopuszczalny czas do uszkodzenia τ_{dop} .
15. Produkcja jest realizowana tylko wówczas, gdy nie ma możliwości uruchomienia procesu odzysku.
16. Jeżeli po uruchomieniu procesu odzysku, zapas znajdujący się w magazynie obiektów wycofanych z eksploatacji przekracza wartość poziomu unieszkodliwiania s_u , to uruchamiany jest proces unieszkodliwiania nadmiaru uszkodzonych obiektów.
17. W ostatnim kroku zgromadzone wartości parametrów wyjściowych modelu symulacyjnego są zapisywane do plików arkusza kalkulacyjnego.

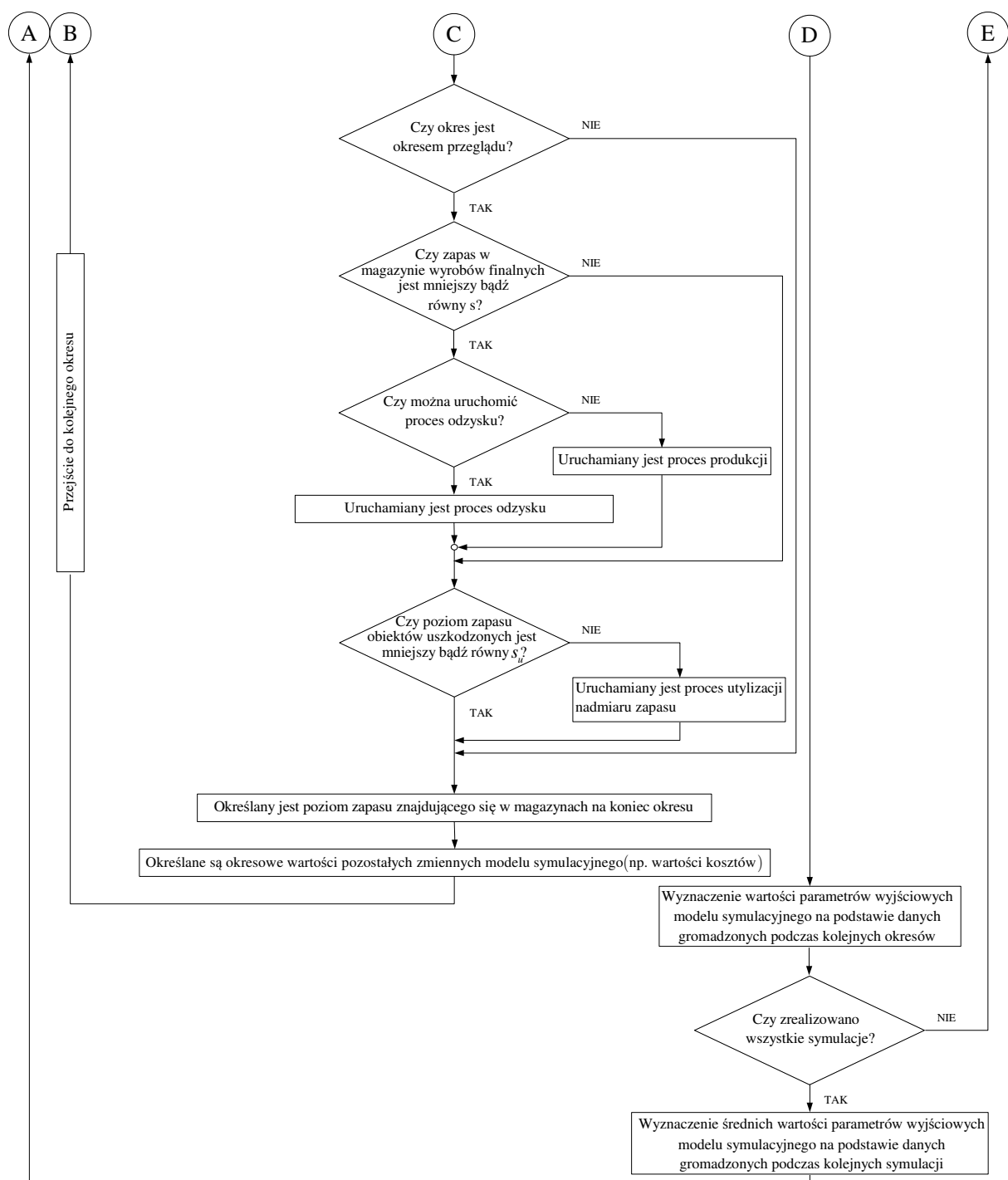
Opisany algorytm symulacji przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunkach 5.1 - 5.2.

W załącznikach do pracy umieszczono przykładowy program symulacyjny (dla jednego z analizowanych parametrów wejściowych) oraz kod funkcji odpowiedzialnej za wyznaczenie liczby obiektów zasilających okresowo system odzysku oraz funkcji służącej do generowania losowych czasów do uszkodzenia obiektów pracujących w systemie eksploatacji.



Rys. 5.1. Algorytm procesu symulacji (a)

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5.2. Algorytm procesu symulacji (b)

Źródło: Opracowanie własne

6. ANALIZA ZGODNOŚCI MODELU SYMULACYJNEGO Z WYNIKAMI UZYSKANymi ANALITYCZNIE

Kolejnym etapem budowy modelu symulacyjnego jest weryfikacja zgodności z modelem analitycznym. Poprawnie skonstruowany model symulacyjny powinien pozwalać na uzyskanie wyników zbliżonych do tych, które otrzymano w sposób analityczny.

Analizę poprawności wyników uzyskanych symulacyjnie przeprowadzono przy założeniu ograniczeń, umożliwiających ich otrzymanie drogą analityczną. Ocenie poddano analizę wpływu zmiany wartości parametru wejściowego τ_{dop} , na podstawowe parametry wyjściowe modelu symulacyjnego i analitycznego. W trakcie obliczeń założono, że wielkość zapotrzebowania na nowe produkty, zgłaszanego okresowo przez system eksploatacji, jest stała. Przyjęto również założenie o wykładniczym charakterze rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas do uszkodzenia obiektu pracującego w systemie eksploatacji. Sposób wyznaczania parametrów wyjściowych modelu przedstawiono w poprzednich rozdziałach. Wartości parametrów wejściowych oraz postaci formuł dla parametrów wyjściowych modelu symulacyjnego pokazano w tabelach 5.1 oraz 5.2. Do obliczeń analitycznych wykorzystano wartości parametrów wejściowych modelu symulacyjnego. Podczas weryfikacji zgodności modelu symulacyjnego z modelem analitycznym ocenie poddano następujące parametry wyjściowe modelu:

\overline{LZ} - średnia liczba obiektów, które zasilily system odzysku;

$POZ_{SE,H}$ - poziom obsługi systemu eksploatacji;

\overline{I}_z - średni poziom zapasu w magazynie obiektów oczekujących na odzysk;

\overline{I}_{np} - średni poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych;

\overline{UP} - średnia liczba uruchomień procesu produkcyjnego;

\overline{UODZ} - średnia liczba uruchomień procesu odzysku;

\overline{B} - średnia wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych;

\overline{TC} - całkowity koszt funkcjonowania systemu odzysku przypadający na jeden okres.

Wybrane wyniki przedstawiono na rysunkach 6.1-6.4. Wszystkie wartości parametrów wyjściowych przedstawione podczas weryfikacji zgodności modelu symulacyjnego, z analitycznym, są wartościami średnimi wyników otrzymanych podczas 30 powtórzeń procesu symulacji. Dla poszczególnych wyników uzyskanych w kolejnych seriach symulacji,

określono maksymalne oraz minimalne wielkości błędów względnych (Tabela 6.1). Błąd względny został wyznaczony przy pomocy następującego wzoru:

$$\delta_{wzg} = \frac{|x_a - x_s|}{x_a}, \quad (6.1)$$

gdzie:

x_a - wartość parametru uzyskana drogą analityczną,

x_s - wartość parametru uzyskana w procesie symulacji.

Tabela 6.1. Maksymalne oraz minimalne wielkości błędów względnych wyznaczonych dla poszczególnych parametrów wyjściowych

Parametr	\overline{LZ}	$POZ_{SE,H}$	$\overline{I_z}$	$\overline{I_{np}}$	\overline{UP}	\overline{UODZ}	\overline{B}	\overline{TC}
$\delta_{wzg} \text{ max}$	0,0015	0,0014	0,0290	0,0038	0,3222	0,0049	0,0054	0,0041
$\delta_{wzg} \text{ min}$	3,16E-07	0,0000	8,69E-05	0,0000	1,65E-16	2,24E-16	0,0000	3,28E-06

Największy błąd względny otrzymano przy wyznaczaniu średniej liczby uruchomień procesu produkcyjnego. Miało to jednak miejsce dla średniej liczby uruchomień produkcji bliskiej zeru.

W celu oceny zgodności otrzymanych wyników, dla wszystkich wartości poszczególnych parametrów, wyznaczono wielkość odchylenia standardowego. Uzyskane wyniki porównano z wartościami parametrów uzyskanymi drogą analityczną. Dla każdej z uzyskanych wartości przeprowadzono test istotności dla dwóch wartości oczekiwanych. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ weryfikacji poddano hipotezę:

$$H_0 : m_1 = m_2, \quad (6.2)$$

wobec hipotezy alternatywnej:

$$H_1 : m_1 \neq m_2, \quad (6.3)$$

gdzie:

m_1, m_2 - porównywane wartości średnie w dwóch populacjach.

W analizowanym przypadku wartość średnia oraz odchylenie standardowe populacji są nieznane. Ponieważ łączna liczebność prób ($n_1 + n_2$) jest większa od 122, to w obliczeniach można wykorzystać estymatory nieznanymi wariancji, tzn. wariancje prób losowych S_1^2 i S_2^2 .

W obliczeniach wykorzystano następujący wzór na zmienną standaryzowaną o rozkładzie normalnym $N(0,1)$ [45, 137]:

$$Z = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}, \quad (6.4)$$

gdzie:

$\overline{X}_1, \overline{X}_2$ - porównywane wartości średnie w dwóch próbach losowych.

Opisany test istotności przeprowadzono dla następujących parametrów wyjściowych:

\overline{LZ} - średnia liczba obiektów, które zasiliły system odzysku;

\overline{I}_z - średni poziom zapasu w magazynie obiektów oczekujących na odzysk;

\overline{I}_{np} - średni poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych;

\overline{UP} - średnia liczba uruchomień procesu produkcyjnego;

\overline{UODZ} - średnia liczba uruchomień procesu odzysku;

\overline{B} - średnia wielkość braku w zapasie wyrobów finalnych.

Z tablic rozkładu $N(0,1)$ dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ odczytano przy dwustronnym obszarze krytycznym wartość $z_{0,05} = 1,96$. Maksymalne wartości $|Z|$ uzyskane przy wykorzystaniu wzoru 6.4 dla poszczególnych parametrów umieszczono w tabelach 6.2 - 6.3.

Tabela 6.2. Maksymalne wartości statystyki $|Z|$ wyznaczone dla poszczególnych parametrów wyjściowych w zależności od parametru τ_{dop}

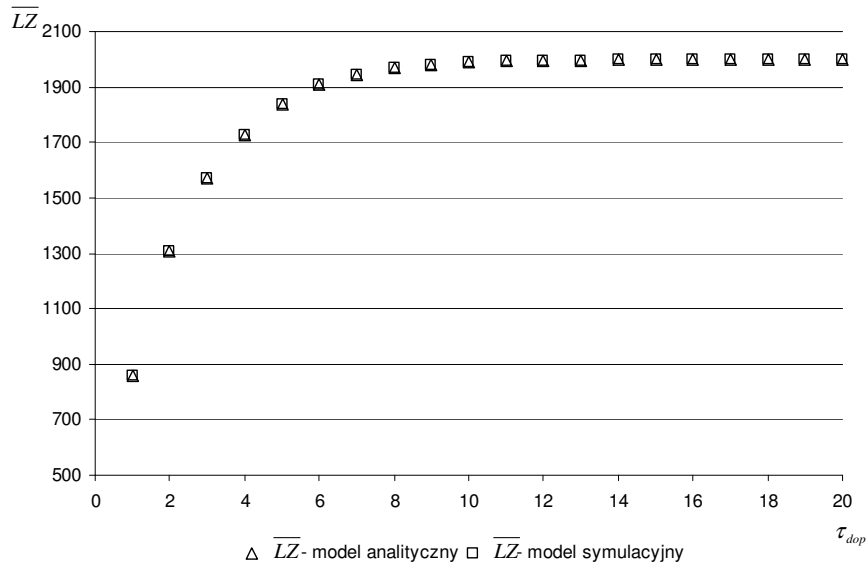
$\tau_{dop} =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\overline{LZ}	$ Z =$	8,468 E-03	2,261 E-01	1,056 E-02	8,801 E-02	8,217 E-02	1,456 E-03	1,146 E-01	1,607 E-01	1,169 E-02	3,670 E-03
\overline{I}_z	$ Z =$	5,584 E-03	1,407 E+00	4,627 E-02	3,366 E-01	2,593 E-01	2,374 E-01	7,763 E-01	6,858 E-01	1,615 E-01	3,762 E-01
\overline{I}_{np}	$ Z =$	0,000 E+00	9,630 E-02	0,000 E+00	3,916 E-02	4,255 E-02	4,817 E-15	5,172 E-02	6,460 E-02	5,106 E-03	7,112 E-03

$\tau_{dop} =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\overline{UP}	$ Z =$	7,659 E-15	1,243 E-01	1,590 E-02	6,827 E-02	4,321 E-03	5,012 E-15	1,008 E-01	1,325 E-01	2,255 E-02	1,761 E-02
\overline{UODZ}	$ Z =$	6,584 E-15	1,045 E-01	1,088 E-02	3,848 E-02	2,124 E-03	2,117 E-14	3,803 E-02	4,326 E-02	6,326 E-03	4,216 E-03
\overline{B}	$ Z =$	4,499 E-15	1,159 E-01	0,000 E+00	3,421 E-02	3,399 E-02	7,227 E-15	3,592 E-02	4,221 E-02	3,163 E-03	4,216 E-03

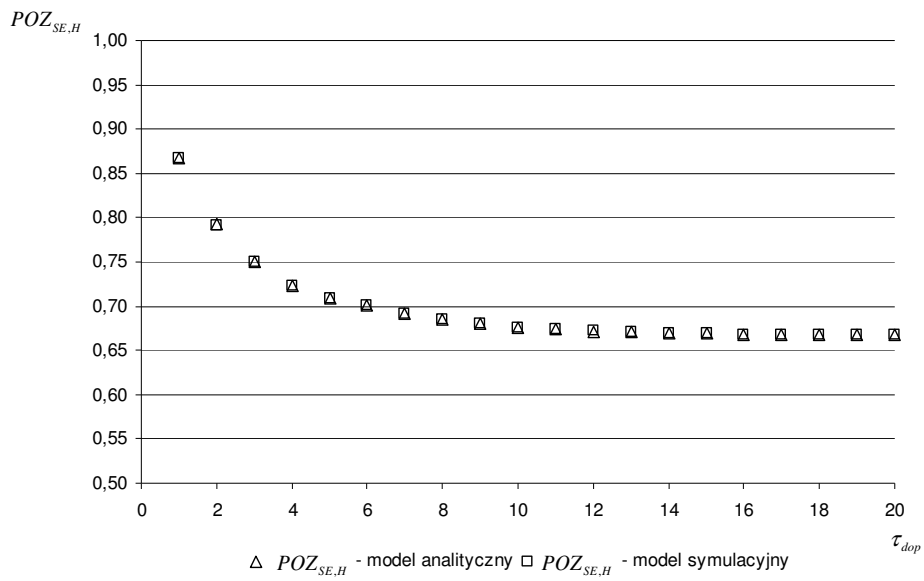
Tabela 6.3. Maksymalne wartości statystyki $|Z|$ wyznaczone dla poszczególnych parametrów wyjściowych w zależności od parametru τ_{dop}

$\tau_{dop} =$		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
\overline{LZ}	$ Z =$	1,955 E-03	2,938 E-03	2,142 E-03	9,295 E-05	2,084 E-03	1,325 E-01	1,442 E-01	5,503 E-04	2,370 E-02	1,422 E-03
$\overline{I_z}$	$ Z =$	4,756 E-01	3,108 E-01	1,572 E-01	2,715 E-02	1,019 E-01	1,088 E-01	1,090 E+00	1,623 E-01	1,808 E+00	1,834 E+00
$\overline{I_{np}}$	$ Z =$	0,000 E+00	1,893 E-03	1,318 E-14	2,007 E-14	6,759 E-15	5,392 E-02	5,822 E-02	1,030 E-14	1,012 E-02	1,727 E-14
\overline{UP}	$ Z =$	5,383 E-16	6,104 E-03	7,419 E-16	4,347 E-16	5,016 E-16	3,126 E-01	3,665 E-01	3,545 E-16	8,181 E-02	2,170 E-16
\overline{UODZ}	$ Z =$	2,458 E-14	1,054 E-03	1,053 E-14	7,022 E-15	1,404 E-14	2,950 E-02	3,055 E-02	1,404 E-14	5,268 E-03	1,404 E-14
\overline{B}	$ Z =$	2,158 E-14	1,054 E-03	1,079 E-14	1,079 E-14	1,438 E-14	2,845 E-02	3,055 E-02	1,438 E-14	5,268 E-03	1,079 E-14

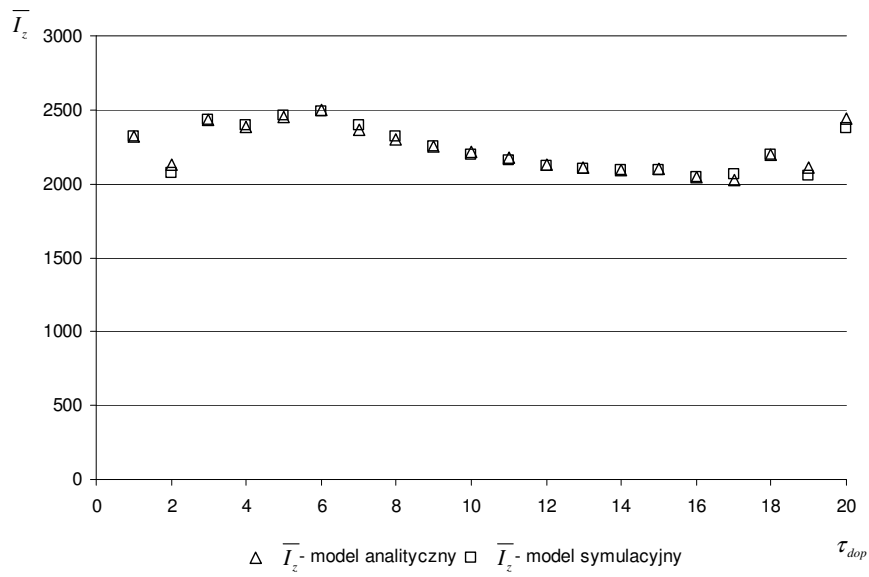
Na podstawie uzyskanych wyników można jednoznacznie stwierdzić, że na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności wyników otrzymanych w procesie symulacyjnym, z wynikami uzyskanymi w sposób analityczny.



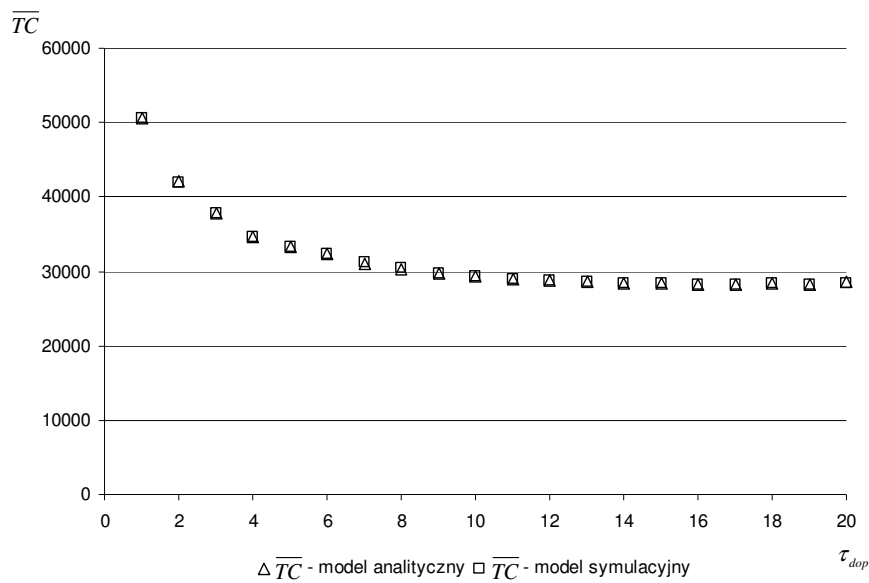
Rys. 6.1. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



Rys. 6.2. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



Rys. 6.3. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



Rys. 6.4. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

7. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI SYMULACYJNEGO MODELU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO PROCESU ZAGOSPODAROWANIA OBIEKTÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI

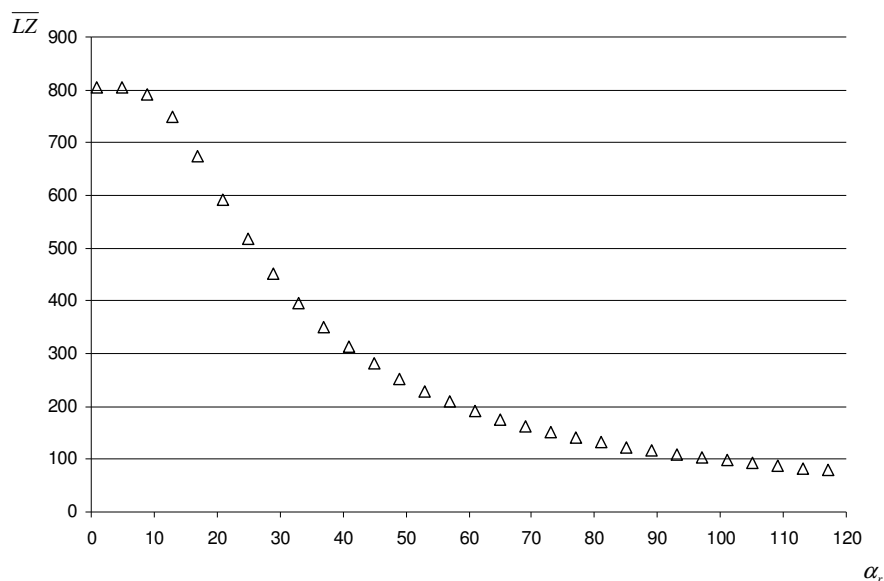
Kolejnym etapem budowy modelu symulacyjnego jest analiza wpływu zmiany wartości parametrów wejściowych na uzyskiwane wyniki charakteryzujące system wsparcia logistycznego. Zakres zmienności badanych parametrów wejściowych przedstawia tabela 5.1. Natomiast sposób wyznaczania parametrów wyjściowych umieszczono w tabeli 5.2.

7.1. Parametry charakteryzujące obiekt techniczny pracujący w systemie eksploatacji

Do analizowanej grupy parametrów zaliczono parametry rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy obiektów technicznych w systemie eksploatacji. Ocenie poddano różne wartości parametrów skali oraz kształtu przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa.

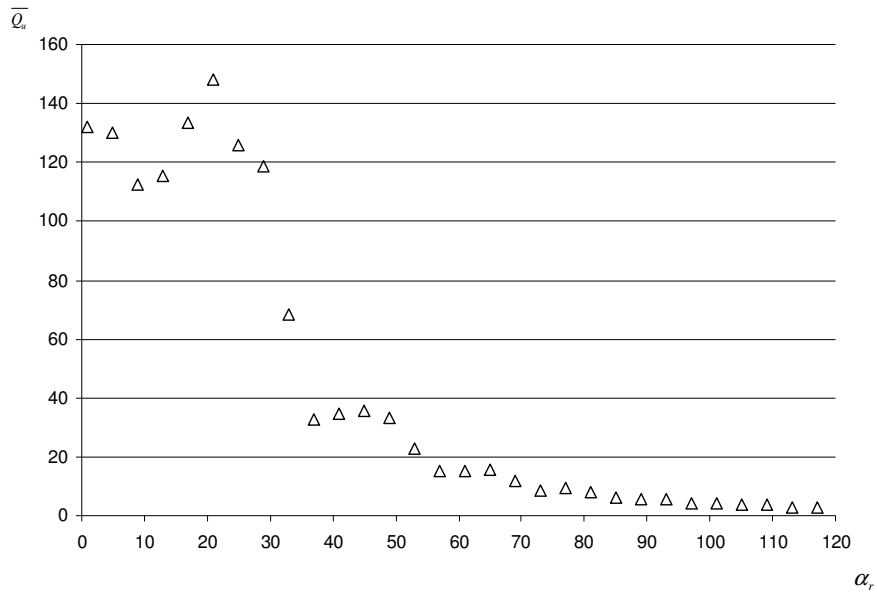
7.1.1. Parametr skali rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu

Zmiana parametru α_r ma istotny wpływ na liczbę obiektów okresowo zasilających system odzysku. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych, zwiększenie wartości parametru skali, powoduje znaczne zmniejszenie prawdopodobieństwa uszkodzenia obiektu, przed upływem dopuszczalnego czasu do uszkodzenia. Wpływ zmiany parametru α_r na liczbę obiektów okresowo zwracanych do systemu odzysku pokazano na rysunku 7.1.

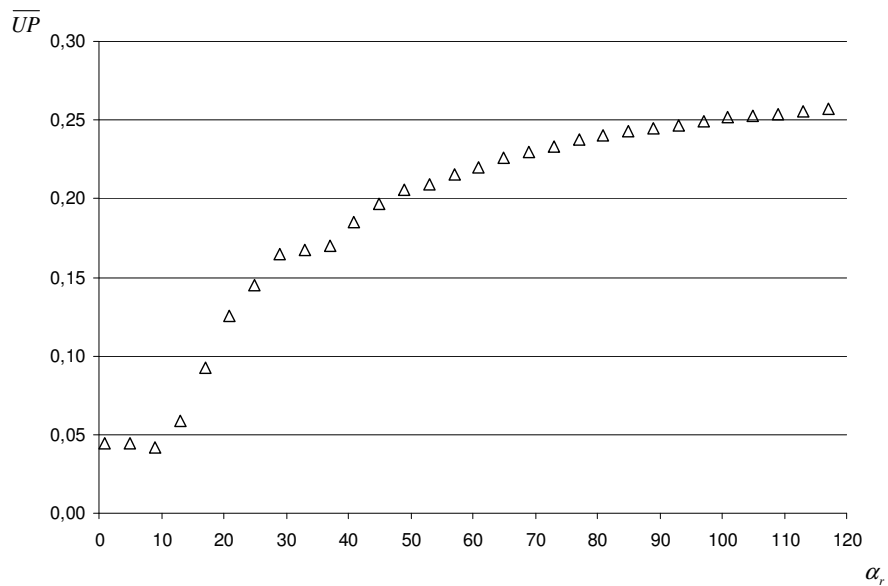


Rys. 7.1. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru α_r

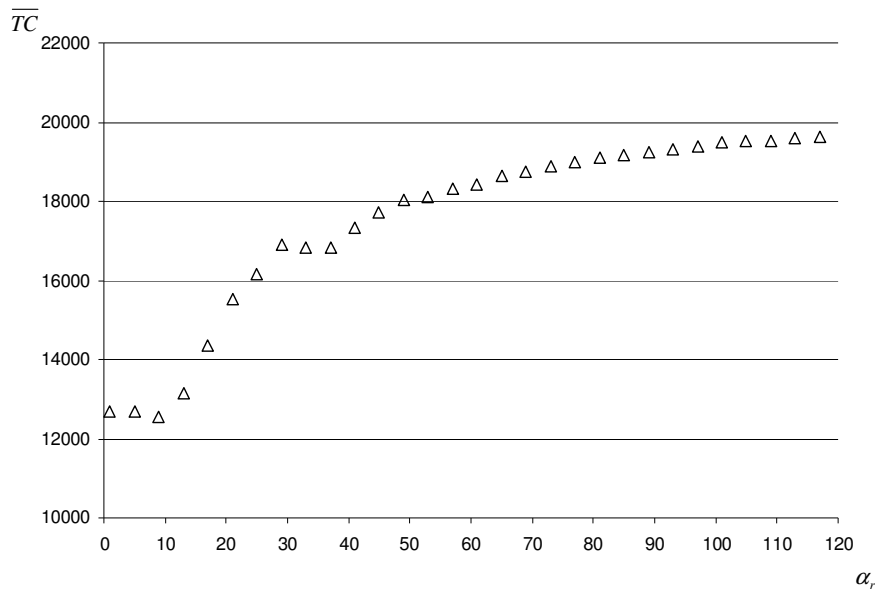
Zmniejszenie liczby obiektów zwracanych do systemu prowadzi do ograniczenia realizacji procesów odzysku. Zmniejszenie średniej liczby uruchomień procesu odzysku powoduje wzrost liczby obiektów pochodzących z produkcji (rys. 7.3). Początkowo zmniejszenie liczby uruchomień procesu odzysku, przy zachowaniu znaczącej liczby zwrotów, powoduje niewielki wzrost poziomu zapasu w magazynie zwrotów, co prowadzi do zwiększenia liczby obiektów poddawanych unieszkodliwianiu (rys. 7.2). Dalsze zwiększanie parametru α_r powoduje obniżenie wartości tych parametrów. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych, zwiększenie udziału produkcji skutkuje zmniejszeniem wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania. Zwiększenie liczby obiektów znajdujących się w systemie eksploatacji sprawia, że spadek liczby zwrotów, spowodowany wzrostem wartości parametru α_r , staje się mniej gwałtowny. Niewielki wzrost poziomu obsługi jest jednak połączony ze wzrostem całkowitych kosztów funkcjonowania systemu (rys.7.4). Jest to spowodowane dużymi kosztami realizacji procesów produkcyjnych, które stanowią znaczną część ogólnych kosztów funkcjonowania systemu. Zwiększenie liczby uruchomień procesu produkcji ma również wpływ na zmniejszenie poziomu zapasu utrzymywanego w magazynie wyrobów finalnych.



Rys. 7.2. Zmienność wartości średniej liczby obiektów poddawanych unieszkodliwianiu, w funkcji zmiany parametru α_r



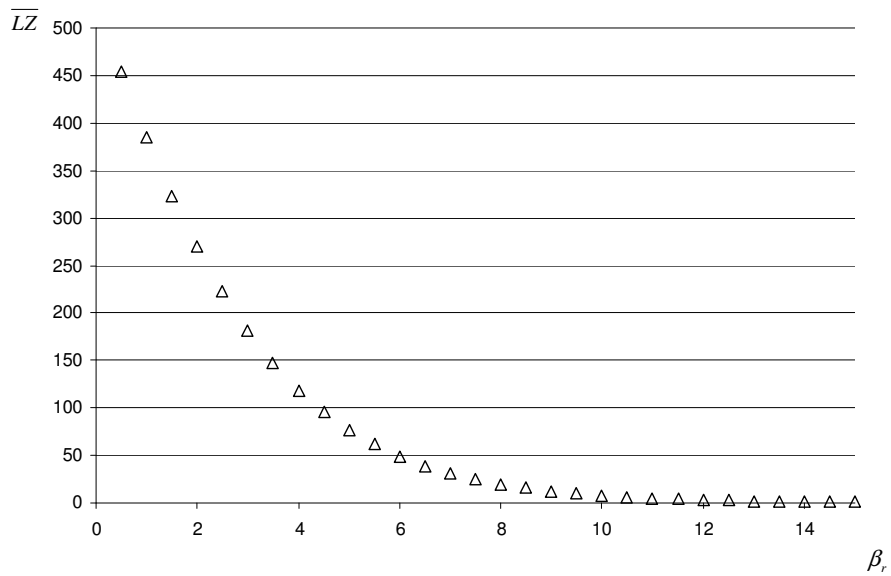
Rys. 7.3. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru α_r



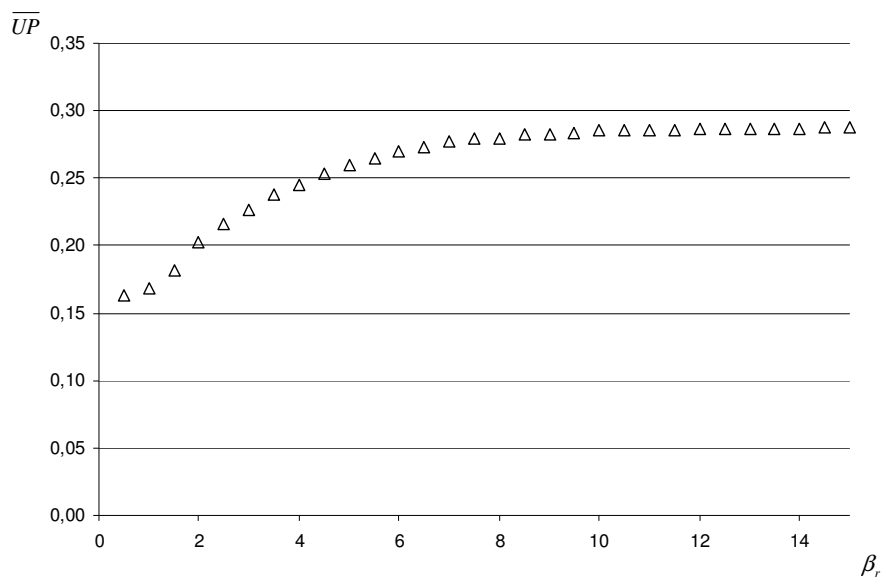
Rys. 7.4. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru α_r ,

7.1.2. Parametr kształtu rozkładu Weibulla opisującego czas do uszkodzenia obiektu

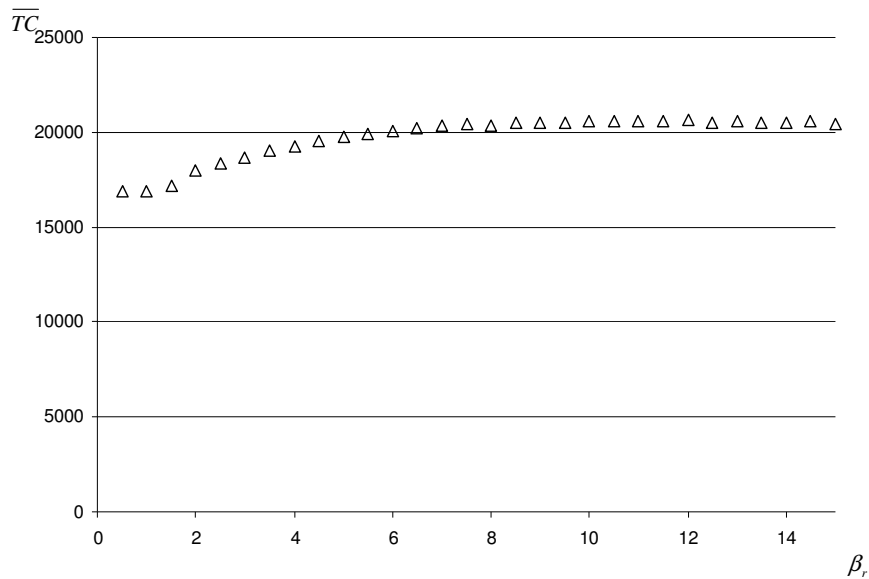
Zmiana parametru kształtu rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas poprawnej pracy obiektów technicznych wywiera istotny wpływ na wartość parametrów wyjściowych modelu systemu wsparcia logistycznego. W analizowanym zakresie zmienności parametrów α_r oraz β_r zwiększenie wartości parametru kształtu powoduje większy spadek liczby obiektów zasilających system odzysku (rys.7.5). Przy założonych wartościach parametrów wejściowych nawet niewielka zmiana parametru kształtu powoduje znaczny spadek liczby obiektów uszkodzonych przed upływem założonego okresu τ_{dop} . Zmniejszenie liczby obiektów zasilających system odzysku wywiera znaczący wpływ na pozostałe parametry wyjściowe modelu. Powoduje między innymi zmniejszenie poziomu zapasu w magazynie zwrotów oraz zwiększenie liczby uruchomień procesu produkcyjnego (rys. 7.6), co prowadzi do zwiększenia kosztów funkcjonowania systemu (rys. 7.7). W badanym zakresie zmienności parametru kształtu uzyskano większy, niż przy zmianie parametru skali, spadek liczby niezrealizowanych zleceń. Jest to spowodowane większym udziałem procesów produkcyjnych.



Rys. 7.5. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru β_r



Rys. 7.6. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru β_r



Rys. 7.7. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru β_r

Możliwe jest stwierdzenie, że przy założonych wartościach parametrów wejściowych modelu symulacyjnego, zwiększenie wartości parametrów rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas do uszkodzenia obiektu technicznego, prowadzi do zmniejszenia liczby obiektów zwracanych do systemu odzysku.

7.2. Parametry charakteryzujące system wsparcia logistycznego

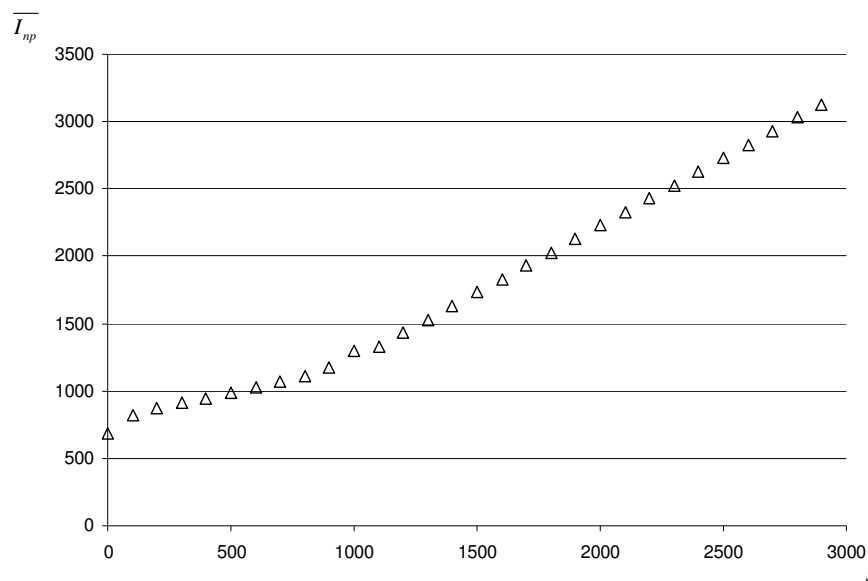
7.2.1. Parametry polityki zaopatrzenia

Działanie analizowanego systemu wsparcia logistycznego opiera się na założonej polityce uzupełniania zapasu. Według tej polityki sygnałem do uzupełnienia zapasu jest obniżenie się jego poziomu do ustalonej wartości zapasu informacyjnego s . Zapas jest uzupełniany przez produkcję nowych wyrobów albo odzysk wartości z obiektów wycofanych z eksploatacji. Produkcja oraz odzysk są realizowane w partiach o ustalonych rozmiarach Q_{prod} oraz Q_{odz} . Obiekty wycofane z eksploatacji są składowane w osobnym magazynie, którego rozmiar jest ograniczony z góry przez poziom informacyjny s_u . Przekroczenie poziomu informacyjnego powoduje usunięcie nadmiaru obiektów.

W obszarze polityki zaopatrzenia analizie poddano wpływ na wyniki modelu, wymienionych parametrów. Rozpatrzono również parametr τ_{dop} , którego wartość wpływa na liczbę obiektów okresowo zasilających system odzysku oraz długość okresu przeglądu T_{prz} .

7.2.1.1. Poziom informacyjny zapasu wyrobów finalnych

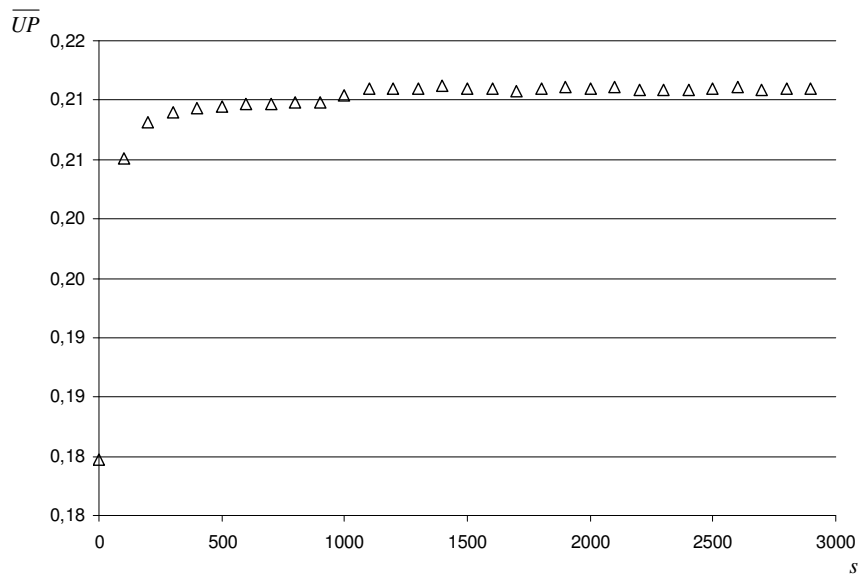
Pierwszym parametrem polityki zaopatrzenia, którego wpływ na podstawowe charakterystyki systemu logistycznego przeanalizowano, jest poziom informacyjny zapasu wyrobów finalnych. Parametr ten odpowiada bezpośrednio za poziom zapasu wyrobów finalnych oraz wyznacza chwilę uruchomienia procesu produkcji oraz odzysku. Na rysunku 7.8 pokazano wpływ zmiany poziomu informacyjnego s na poziom zapasu wyrobów finalnych. Można zauważyć, że poziom zapasu zwiększa się istotnie wraz ze wzrostem wartości badanego parametru.



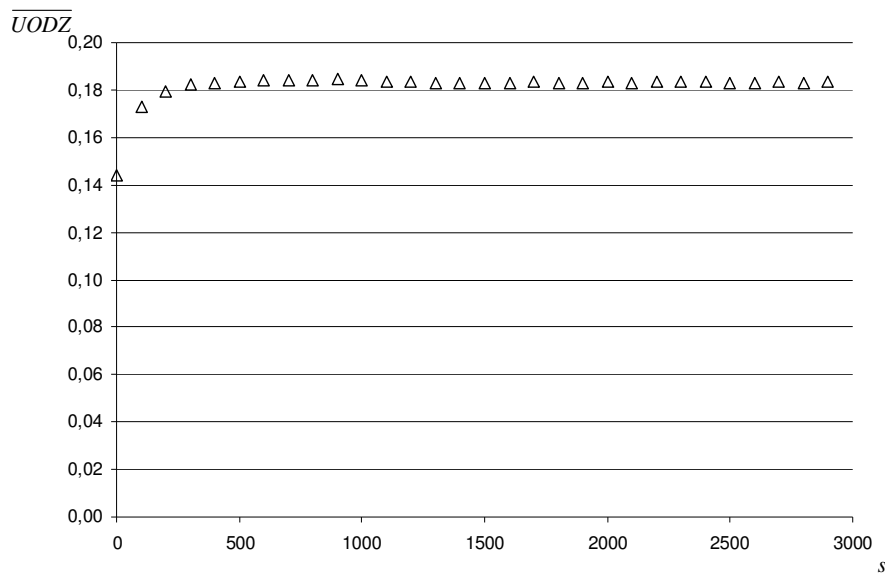
Rys. 7.8. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu wyrobów finalnych, w funkcji zmiany parametru s

W procesie symulacji założono, że zapotrzebowanie zgłaszane okresowo przez system eksploatacji jest opisane rozkładem Poissona z parametrem $\lambda_D = 1000$. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych modelu symulacyjnego, wzrost wartości poziomu informacyjnego wywiera znaczący wpływ na pozostałe charakterystyki systemu tylko w ograniczonym zakresie (dla $s \leq \lambda_D$). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż dla $s > \lambda_D$ zmiana pozostałych parametrów wyjściowych modelu, takich jak: średnia liczba zwrotów do systemu, poziom obsługi, średnia wielkość zapasu obiektów uszkodzonych, czy liczba uruchomień procesu produkcji oraz odzysku, jest niewielka. W analizowanym zakresie zmienności parametru s średnia wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania spada do zera

dla $s = 1100$. Na rysunkach 7.9 oraz 7.10 pokazano wpływ zmiany wartości parametru s na liczbę uruchomień procesów produkcji oraz odzysku.

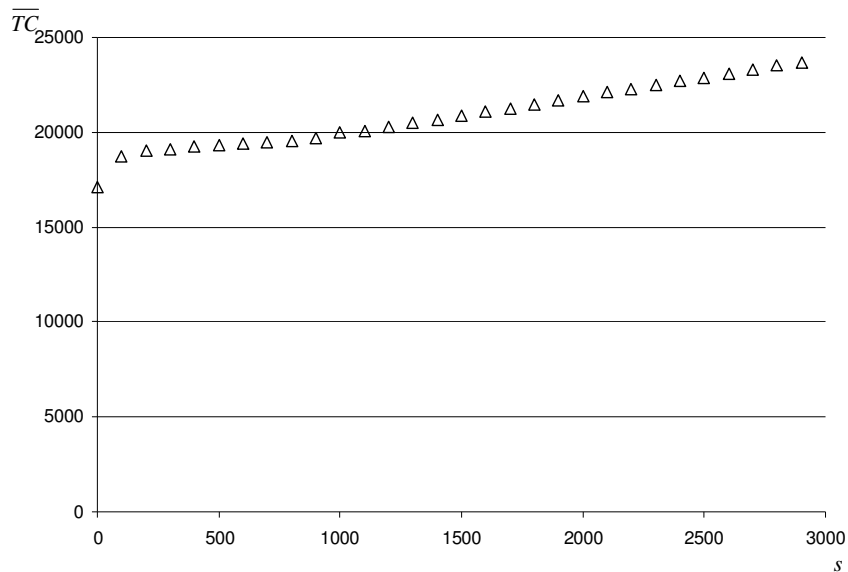


Rys. 7.9. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru s



Rys. 7.10. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu odzysku, w funkcji zmiany parametru s

Wzrost wartości parametru s powoduje zwiększenie łącznych kosztów funkcjonowania systemu wsparcia logistycznego (rys.7.11). Jest to spowodowane przede wszystkim rosnącymi kosztami składowania wyrobów finalnych.



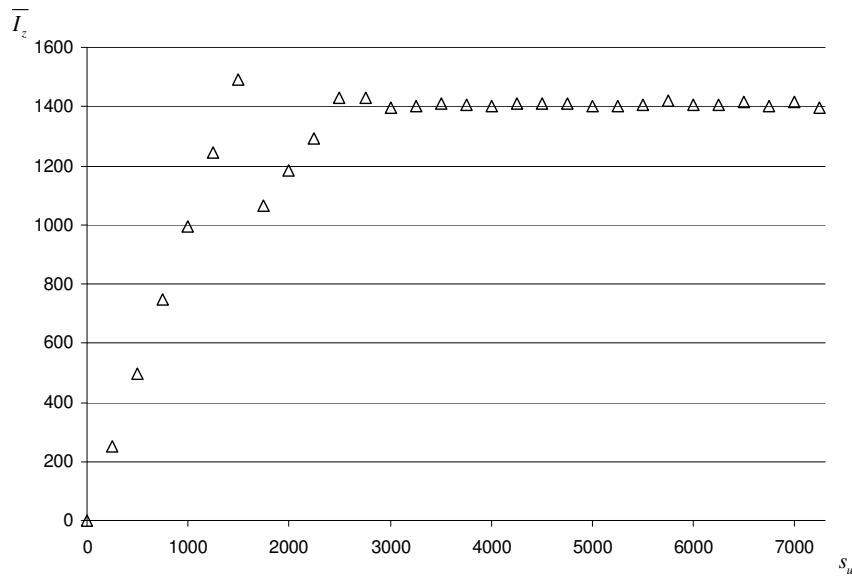
Rys. 7.11. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru s

7.2.1.2. Poziom informacyjny zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji

W analizowanym systemie wsparcia logistycznego magazyn zwrotów jest zasilany losową liczbą obiektów. W przypadku braku uruchomienia procesu odzysku poziom zapasu we wspomnianym magazynie mógłby stale rosnać, zwiększając koszty funkcjonowania systemu. Dodatkowo wymagałoby to nieograniczonej przestrzeni składowania, co trudno wyobrazić sobie w rzeczywistym systemie. W analizowanym systemie uwzględniono parametr sterujący poziomem zapasu w magazynie zwrotów. Przekroczenie ustalonego poziomu informacyjnego powoduje uruchomienie procesu unieszkodliwiania nadmiaru zapasu.

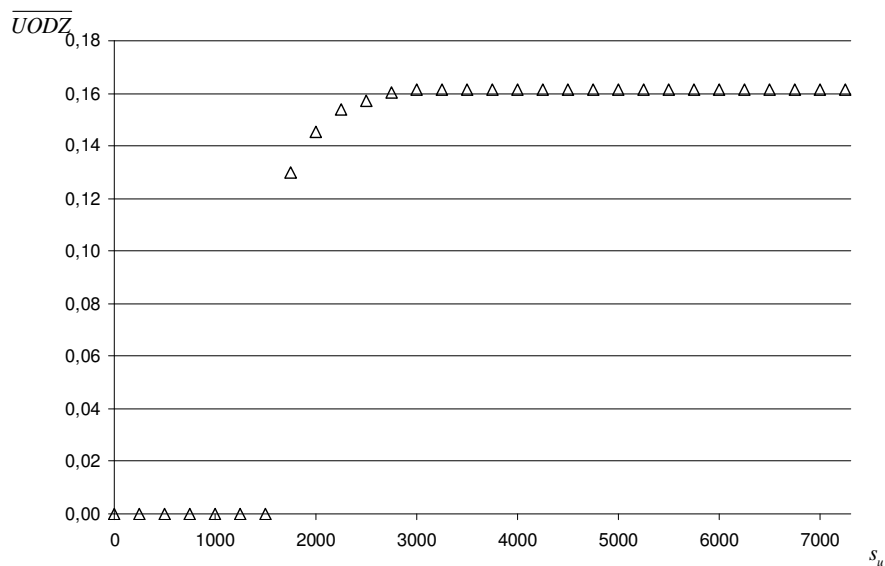
Kolejnym etapem analizy wrażliwości jest ocena wpływu zmiany poziomu informacyjnego s_u na parametry wyjściowe analizowanego modelu.

Wzrost wartości parametru s_u wpływa bezpośrednio na zwiększenie poziomu zapasu, w magazynie obiektów oczekujących na odzysk (rys. 7.12).



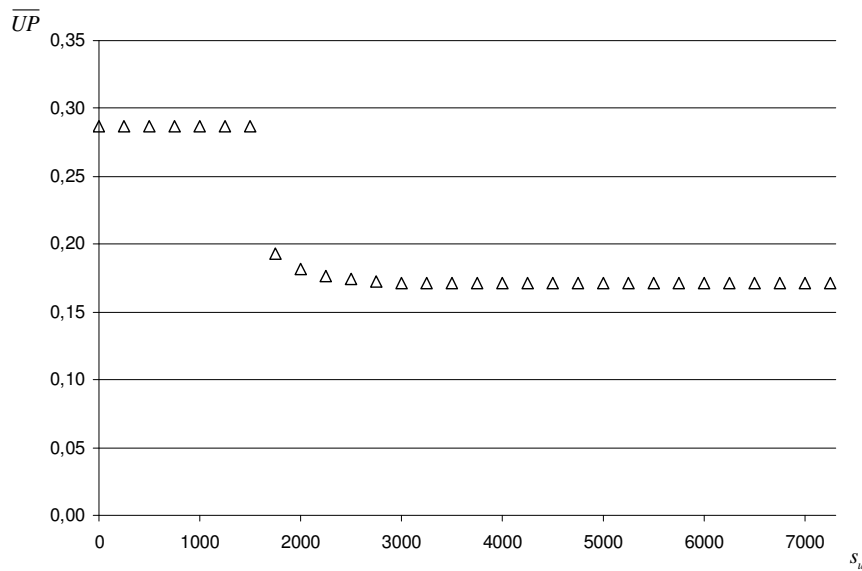
Rys. 7.12. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru s_u

Zwiększenie dopuszczalnej liczby obiektów mogących znajdować się w magazynie zwrotów wpływa na realizację procesu odzysku. Przy ustalonym zakresie zmienności badanego parametru dla $s_u < (Q_{odz} + \bar{LZ})$ uruchomienie procesu odzysku jest niemożliwe. Powyżej tej wartości liczba realizacji procesu odzysku rośnie. Wartości poziomu informacyjnego $s_u \geq 2750$ przestają mieć istotny wpływ na proces odzysku, ponieważ wykorzystywane są niemal wszystkie produkty zwracane do systemu (rys. 7.13).

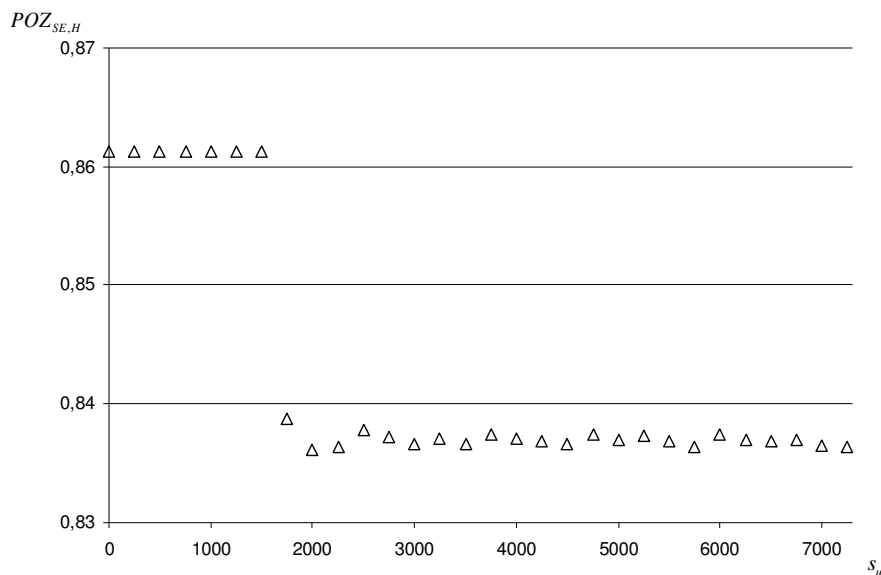


Rys. 7.13. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru s_u

Zwiększenie liczby uruchomień procesu odzysku wpływa na proces produkcyjny, ograniczając jego realizację (rys. 7.14). Zmniejszenie średniej liczby uruchomień liczniejszych partii produkcyjnych powoduje obniżenie poziomu zapasu wyrobów finalnych, co z kolei zmniejsza wskaźnik poziomu obsługi systemu eksploatacji (rys. 7.15).



Rys. 7.14. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru s_u



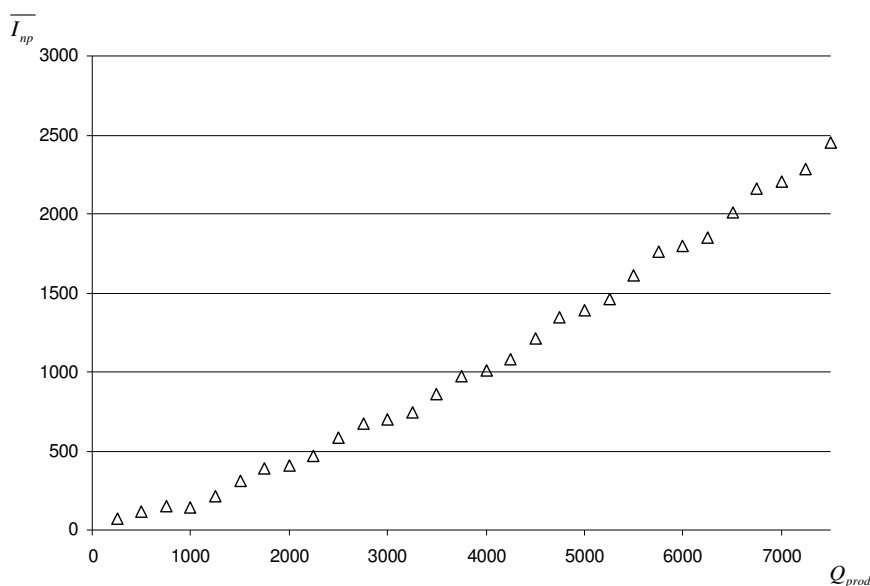
Rys. 7.15. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji w funkcji zmiany parametru s_u

Wpływ poziomu informacyjnego s_u na pozostałe charakterystyki modelu zależy wyłącznie od zmiany wyżej opisanych parametrów.

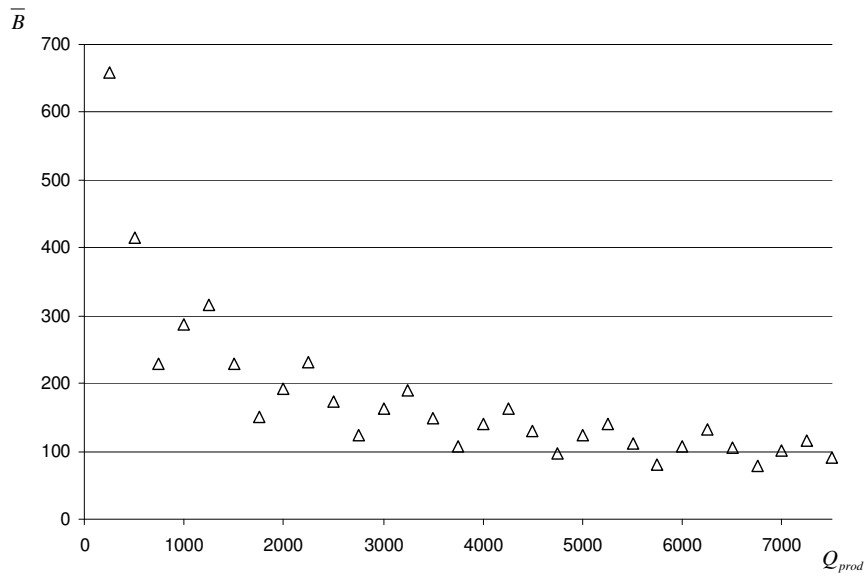
7.2.1.3. Wielkość partii produkcyjnej

Kolejnym parametrem polityki zaopatrzenia jest wielkość partii produkcyjnej. Parametr ten wpływa na długość cyklu produkcji. Zwiększanie partii produkcyjnej prowadzi do podniesienia średniego poziomu zapasu wyrobów finalnych (rys. 7.16). Podniesienie poziomu zapasu sprawia, że zmniejsza się wielkość niezrealizowanego zapotrzebowania (rys. 7.17) co skutkuje zwiększeniem poziomu obsługi systemu eksploatacji.

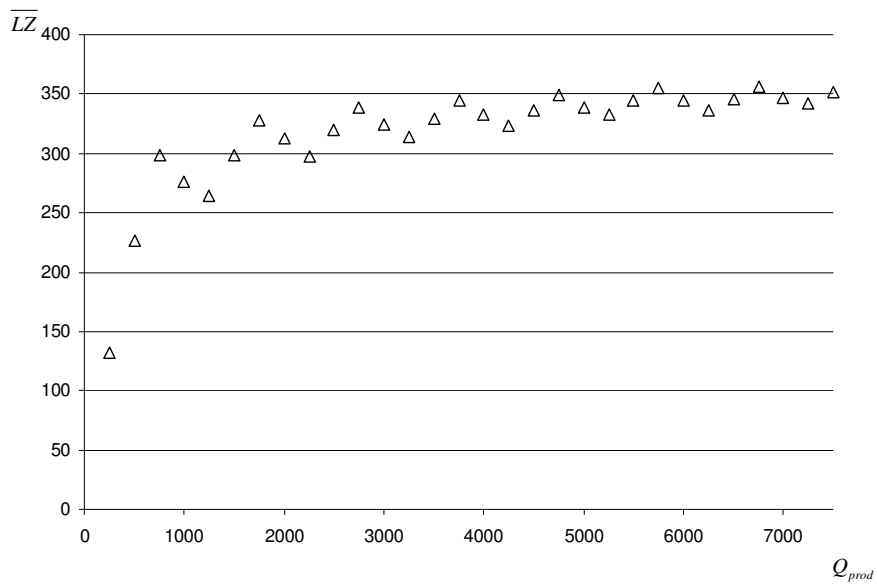
Wzrost liczby zrealizowanych zleceń prowadzi do zwiększenia liczby obiektów znajdujących się w systemie eksploatacji, co z kolei wpływa na zwiększenie średniej liczby zwrotów do systemu. Zależność ta została pokazana na wykresie 7.18. Zwiększenie liczby zwrotów do systemu powoduje początkowo wzrost liczby uruchomień procesu odzysku. Jednakże znaczne wydłużenie cyklu produkcji prowadzi w konsekwencji do ograniczenia realizacji procesów odzysku (rys. 7.19) oraz podniesienia poziomu zapasu w magazynie zwrotów. Zwiększenie partii produkcyjnej prowadzi do zmniejszenia poziomu wykorzystania obiektów wycofanych z eksploatacji, których nadmiar jest unieszkodliwiany (rys. 7.20).



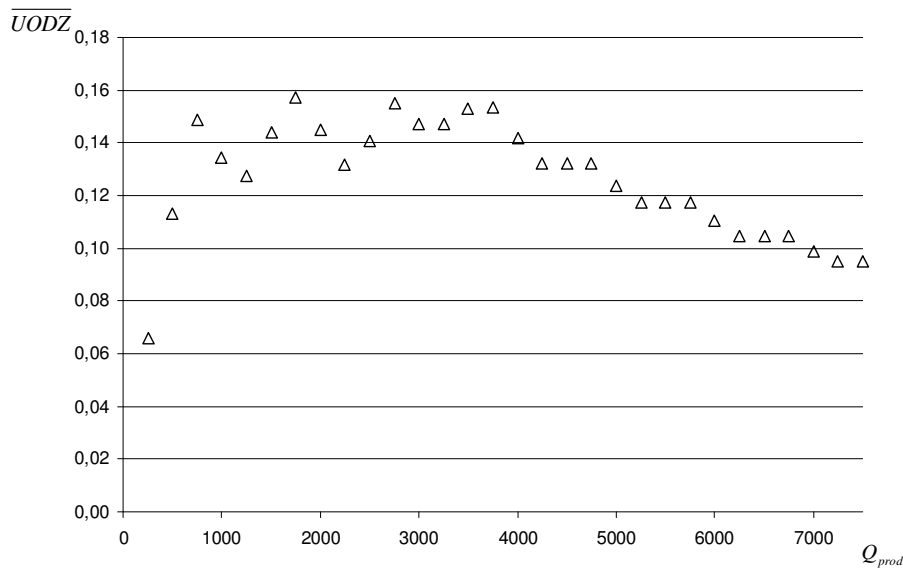
Rys. 7.16. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu wyrobów finalnych, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}



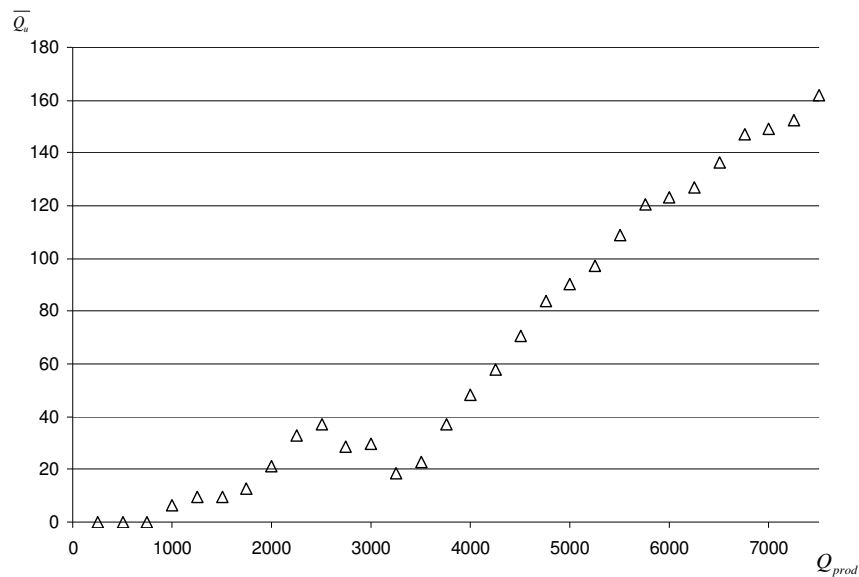
Rys. 7.17. Zmienność wartości średniej wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}



Rys. 7.18. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}

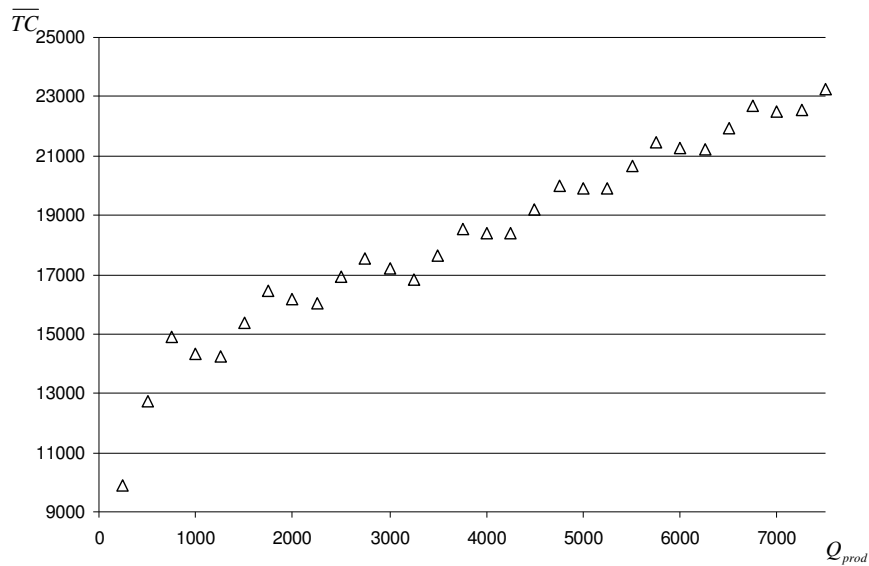


Rys. 7.19. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}



Rys. 7.20. Zmienność wartości średniej liczby obiektów poddanych unieszkodliwianiu, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}

Zwiększanie partii produkcyjnej podnosi poziom obsługi systemu eksploatacji, ale negatywnie wpływa na koszty funkcjonowania systemu. Wiąże się ze znacznym podniesieniem kosztów utrzymania zapasów i unieszkodliwienia nadwyżek magazynowych w analizowanym horyzoncie czasu. Wpływ analizowanego parametru na koszty funkcjonowania systemu przedstawiono na rysunku 7.21.

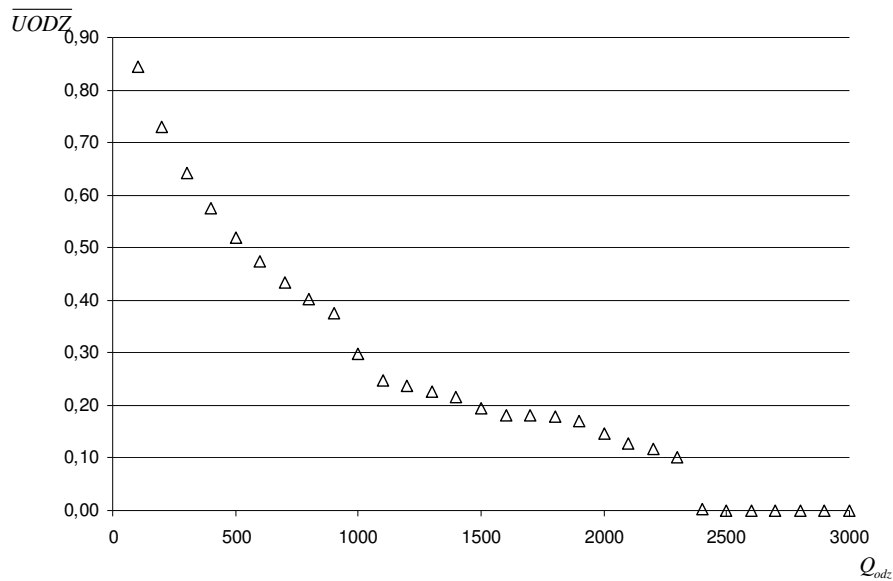


Rys. 7.21. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{prod}

7.2.1.4. Wielkość partii odzysku

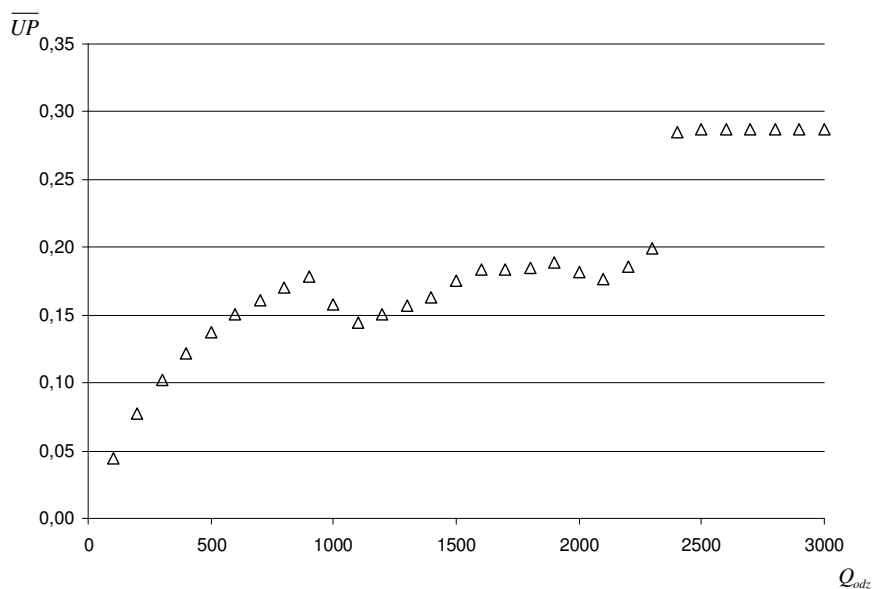
W analizowanym systemie proces odzysku, podobnie jak produkcja, jest realizowany w partiach. Wielkość partii odzysku jest stała dla całego horyzontu planowania. Następnym etapem badania wrażliwości modelu symulacyjnego jest ocena wpływu zmiany wielkości partii odzysku na podstawowe charakterystyki systemu.

Wartość analizowanego parametru determinuje chwilę uruchomienia procesu odzysku. Wraz ze wzrostem wielkości partii odzysku maleje średnia liczba uruchomień procesu odzysku (rys. 7.22). Podnosi się również średni poziom zapasu obiektów uszkodzonych, który dla dużych wartości Q_{odz} stabilizuje się na poziomie wyznaczonym przez wielkość zapasu informacyjnego s_u . Przy złożonym zakresie zmienności badanego parametru proces odzysku przestaje być realizowany dla $Q_{odz} \leq 2400$, ponieważ średni poziom zapasu w magazynie zwrotów jest utrzymywany na stałym poziomie $I_z = s_u = 2000$, a średnia liczba zwrotów do systemu nie przekracza 333 sztuk.



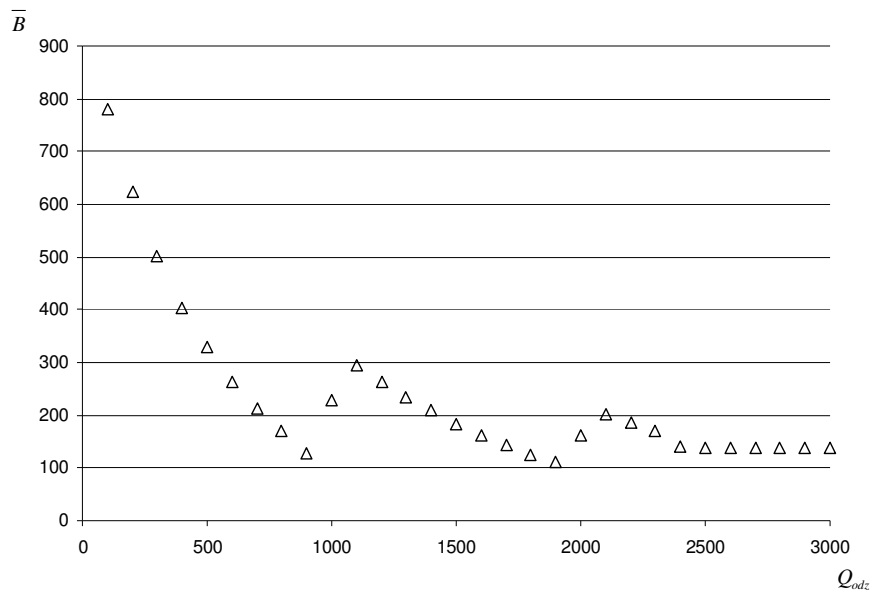
Rys. 7.22. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu odzysku, w funkcji zmiany parametru Q_{odz}

Wraz z obniżaniem się średniej liczby uruchomień procesu odzysku wzrasta udział produkcji (rys. 7.23). Zwiększenie liczby uruchomień procesu produkcyjnego prowadzi do wzrostu poziomu obsługi systemu eksploatacji, co przekłada się na zwiększenie liczby obiektów zwracanych po powstaniu uszkodzenia.



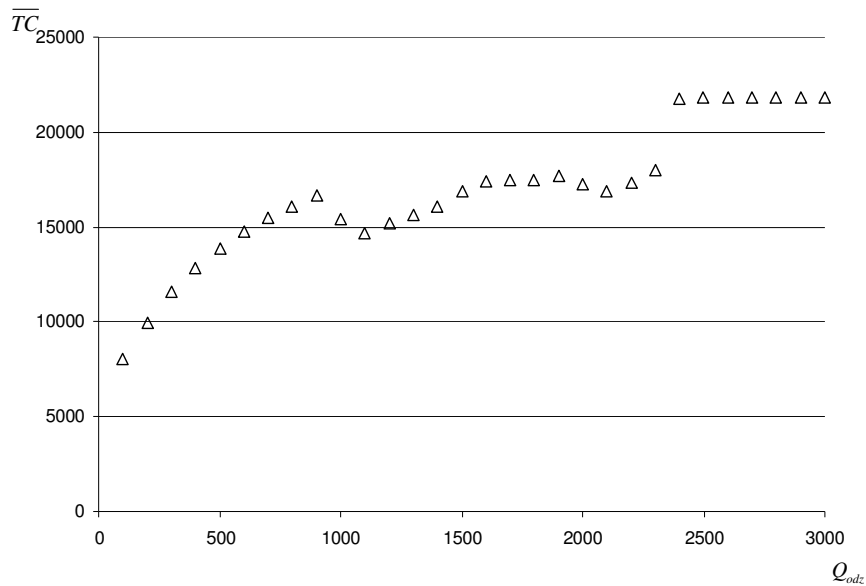
Rys. 7.23. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru Q_{odz}

Wpływ zmiany wielkości partii odzysku na średnią liczbę braków w zapasie wyrobów finalnych przedstawiono na wykresie 7.24.



Rys. 7.24. Zmienność wartości średniej wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania, w funkcji zmiany parametru Q_{odz}

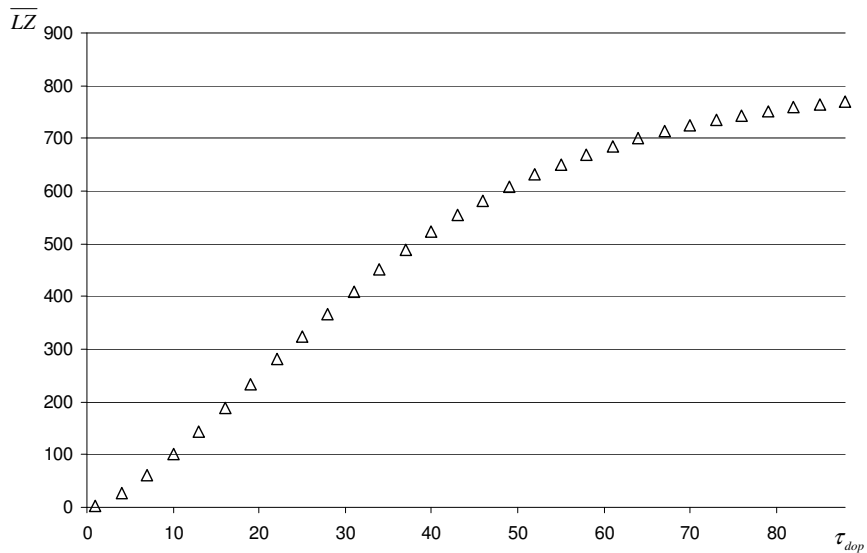
Zwiększenie wielkości partii odzysku ma istotny wpływ na wyniki ekonomiczne analizowanego systemu wsparcia logistycznego. Zależność pomiędzy wartością badanego parametru, a poziomem całkowitych kosztów funkcjonowania systemu pokazuje wykres 7.25. Przedstawiona analiza pokazuje, że dobór odpowiednich wartości parametrów Q_{odz} oraz Q_{prod} ma istotny wpływ na proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych modelu, ustalenie wielkości partii odzysku na poziomie 900 sztuk wydaje się najlepszym rozwiązaniem. Powoduje utrzymanie wysokiego poziomu wykorzystania obiektów wycofanych z eksploatacji, przy jednoczesnym zwiększeniu poziomu obsługi i niewysokich kosztach funkcjonowania systemu.



Rys. 7.25. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru Q_{odz}

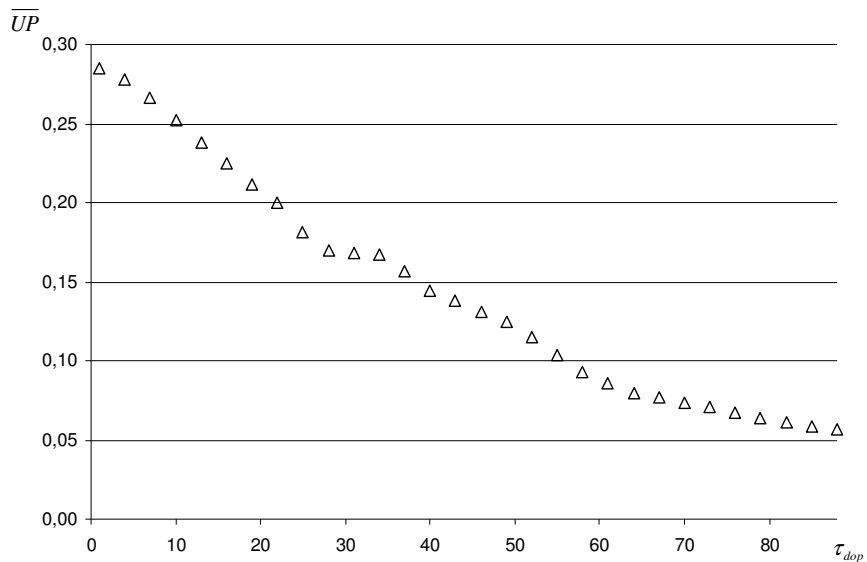
7.2.1.5. Dopuszczalny czas do uszkodzenia

Kolejnym parametrem, który został poddany ocenie w procesie analizy wrażliwości opracowanego modelu symulacyjnego jest dopuszczalny czas do uszkodzenia τ_{dop} . Zmiana wartości tego parametru istotnie wpływa na wszystkie wyniki analizowanego systemu wsparcia logistycznego. Zwiększenie wartości dopuszczalnego czasu do uszkodzenia prowadzi do wzrostu średniej liczby obiektów okresowo zasilających system odzysku. Wpływ zmiany parametru τ_{dop} na liczbę obiektów zwracanych do systemu pokazano na rysunku 7.26.

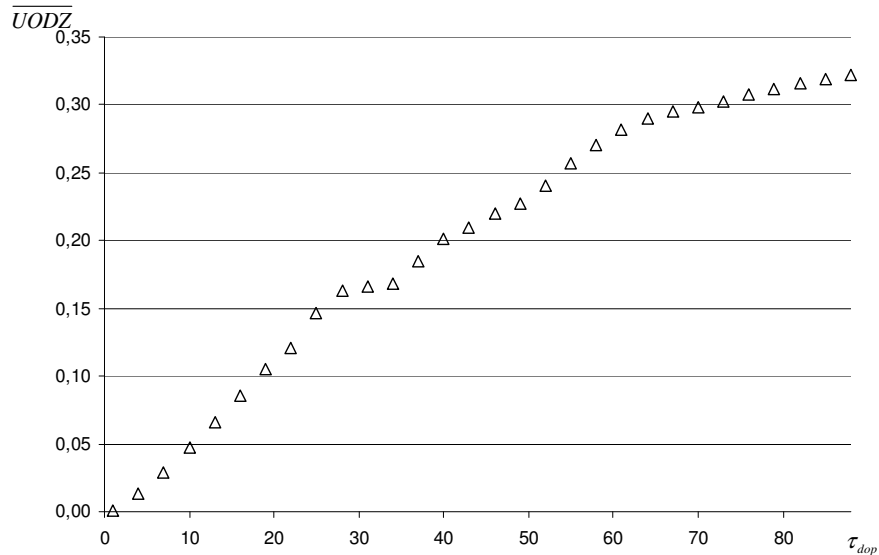


Rys. 7.26. Zmienność wartości średniej liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

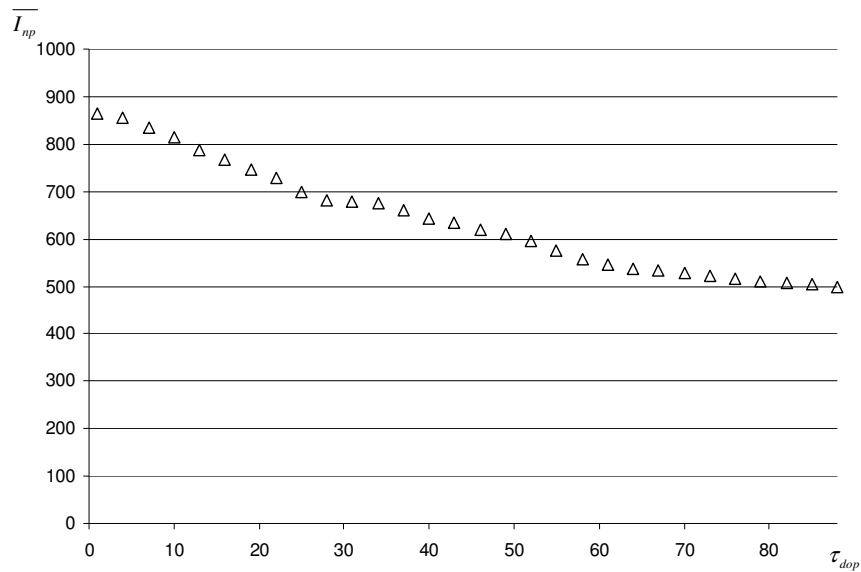
Wraz ze wzrostem liczby obiektów zasilających system zmniejsza się liczba uruchomień procesu produkcyjnego (rys. 7.27), który jest zastępowany przez odzysk wartości z uszkodzonych obiektów (rys. 7.28). Powoduje to zmniejszenie poziomu zapasu wyrobów finalnych (rys. 7.29).



Rys. 7.27. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



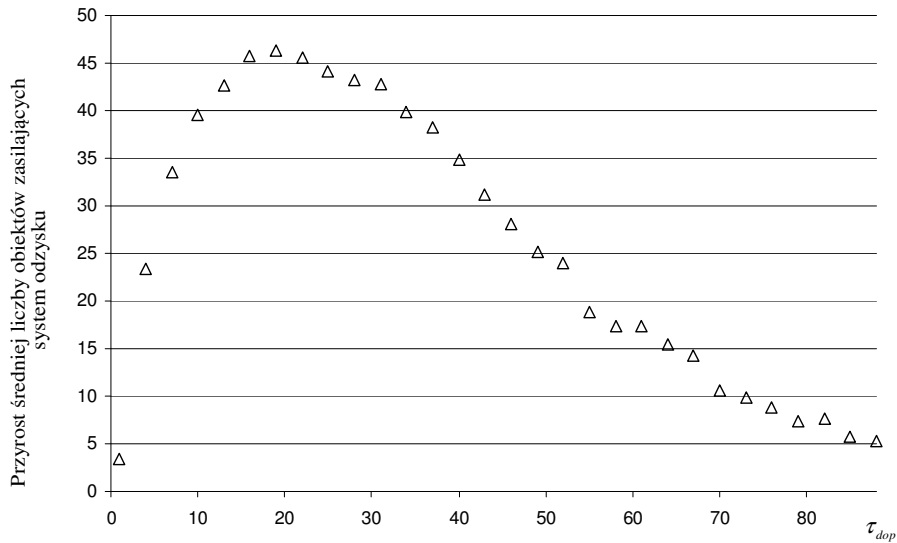
Rys. 7.28. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



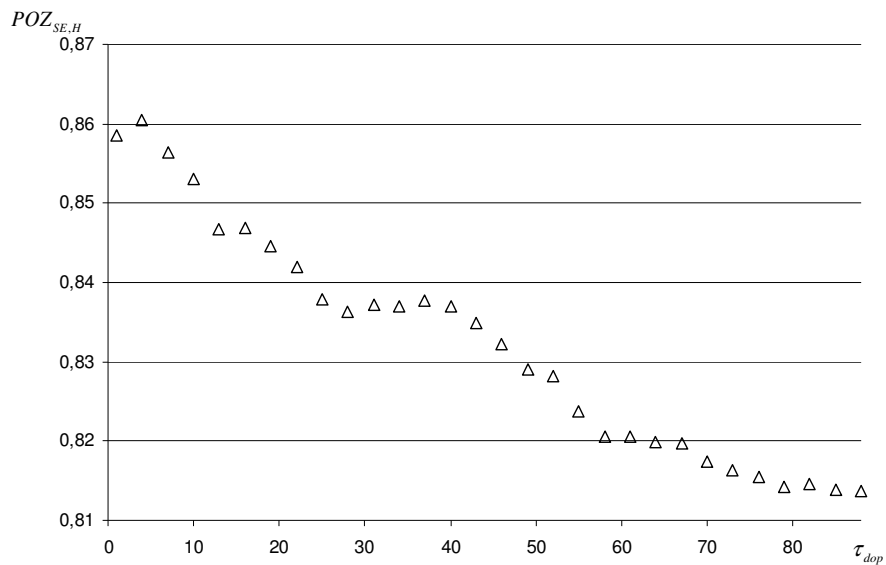
Rys. 7.29. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu wyrobów finalnych, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że przyrost liczby zwrotów zwiększa się dla $\tau_{dop} < 19$, osiąga maksimum dla $\tau_{dop} = 19$, a następnie stopniowo maleje (rys. 7.30). Zmniejszanie się przyrostu jest związane z mniejszą liczbą obiektów znajdujących się w systemie eksploatacji, na skutek obniżenia poziomu obsługi (rys. 7.31). Zwiększenie

liczby niezrealizowanych zleceń jest spowodowane zmniejszeniem poziomu zapasu wyrobów finalnych.



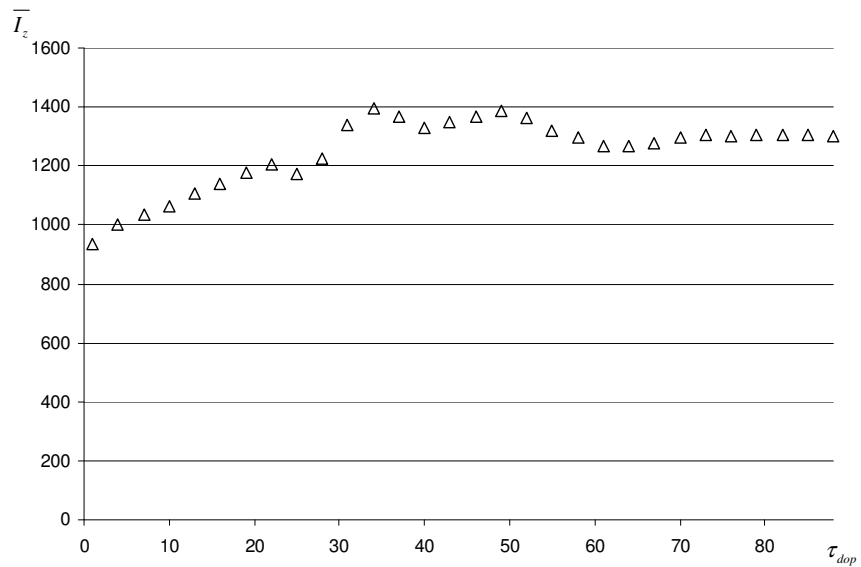
Rys. 7.30. Przyrost średniej liczby obiektów zasilających system odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



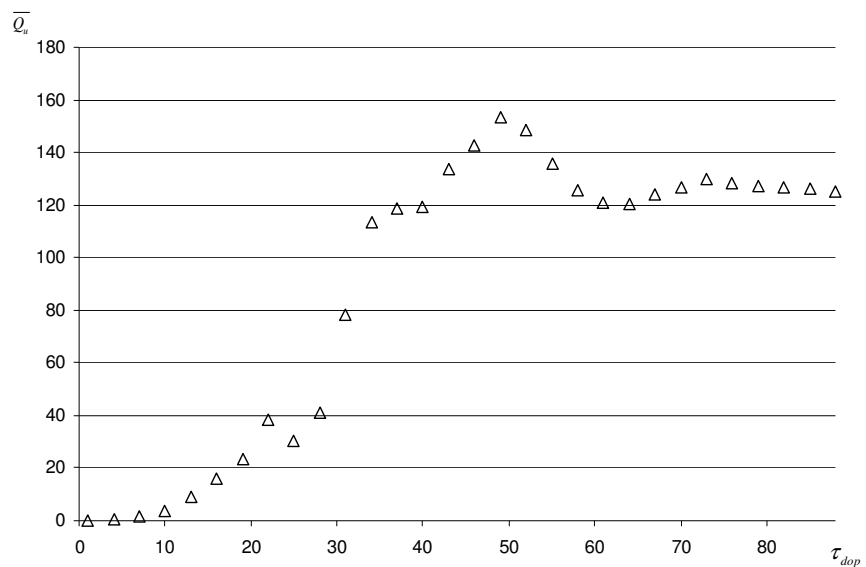
Rys. 7.31. Zmienność wartości poziomu obsługi systemu eksploatacji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

Wzrost liczby obiektów zwracanych do systemu odzysku prowadzi do podniesienia poziomu zapasu obiektów oczekujących na odzysk (rys. 7.32), co z kolei zwiększa średnią

liczbę unieszkodliwianych obiektów (rys. 7.33). Można zauważyć, że dla $\tau_{dop} > 50$ średnia wartość partii w procesie unieszkodliwiania oraz średni zapas obiektów uszkodzonych stabilizują się na pewnym poziomie.

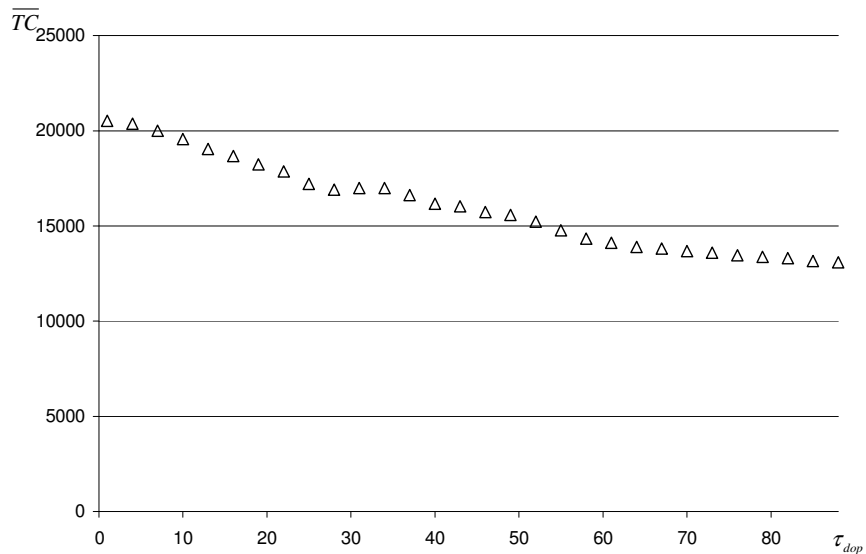


Rys. 7.32. Zmienność wartości średniej poziomu zapasu obiektów wycofanych z eksploatacji, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

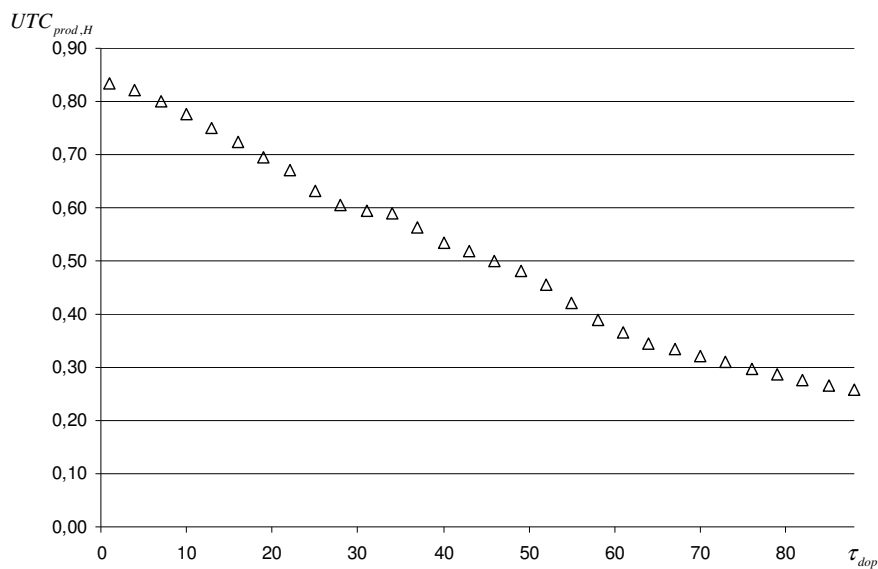


Rys. 7.33. Zmienność wartości średniej liczby obiektów poddanych unieszkodliwieniu, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

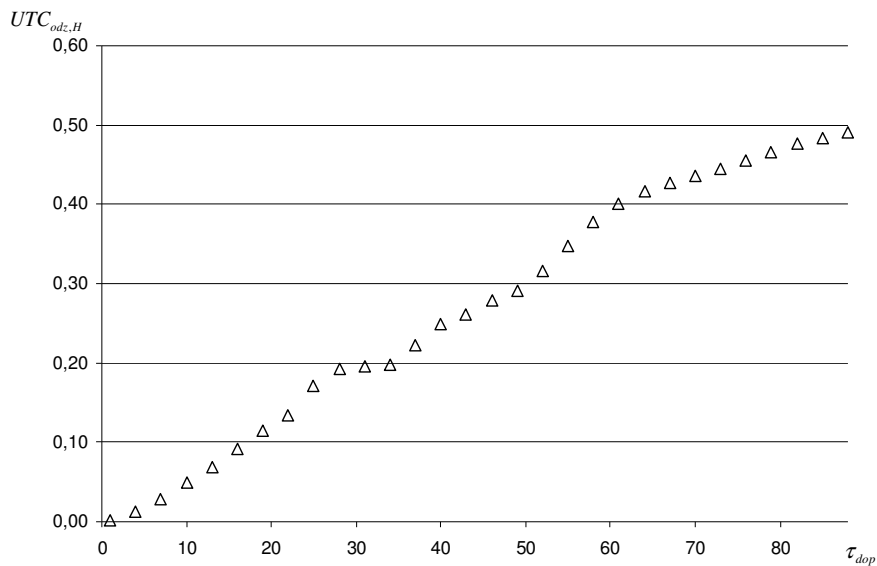
Zwiększenie dopuszczalnego czasu do uszkodzenia, dla obiektów technicznych wycofanych z eksploatacji, wywiera znaczący wpływ na poziom kosztów funkcjonowania systemu. Na wykresach 7.34 – 7.36 przedstawiono wpływ ocenianego parametru na wybrane parametry ekonomiczne systemu wsparcia logistycznego. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że obniżenie łącznych kosztów funkcjonowania systemu jest spowodowane przede wszystkim ograniczeniem kosztownej produkcji na rzecz tańszego odzysku.



Rys. 7.34. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}



Rys. 7.35. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu produkcji, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

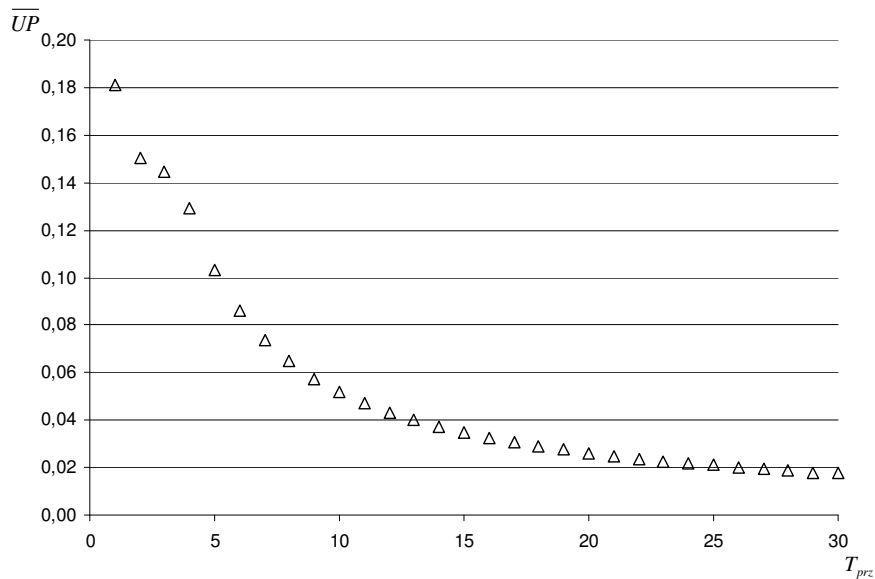


Rys. 7.36. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów realizacji procesu odzysku, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru τ_{dop}

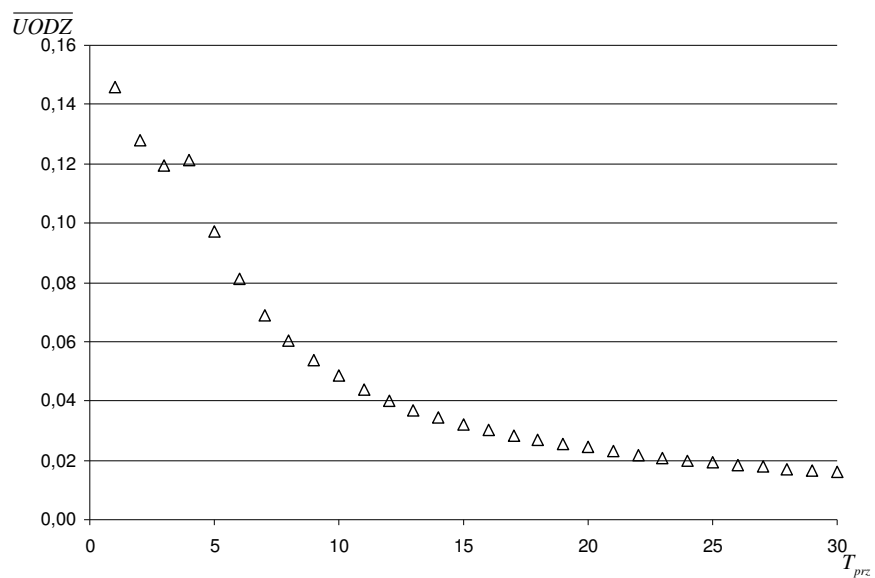
7.2.1.6. Okres przeglądu

W procesie analizy wrażliwości modelu symulacyjnego założono, że przegląd stanów magazynowych jest realizowany, w każdym z okresów określonego horyzontu planowania. W rzeczywistym systemie korygowanie poziomu zapasu w każdym okresie może okazać się trudne do realizacji. W kolejnym kroku sprawdzono, jak zmiana długości okresu przeglądu wpływa na badane charakterystyki systemu wsparcia logistycznego.

Wydłużenie okresu przeglądu prowadzi do zmniejszenia średniej liczby uruchomień procesów produkcji oraz odzysku (rys. 7.37 – 7.38), przez co zmniejsza się poziom zapasu w magazynie wyrobów finalnych.

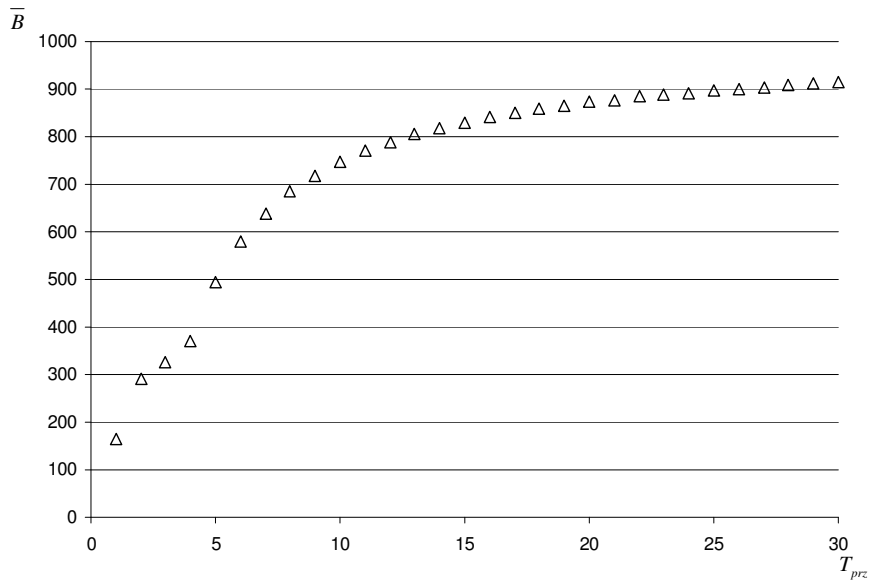


Rys. 7.37. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu produkcji, w funkcji zmiany parametru T_{prz}



Rys. 7.38. Zmienność wartości średniej liczby uruchomień procesu odzysku, w funkcji zmiany parametru T_{prz}

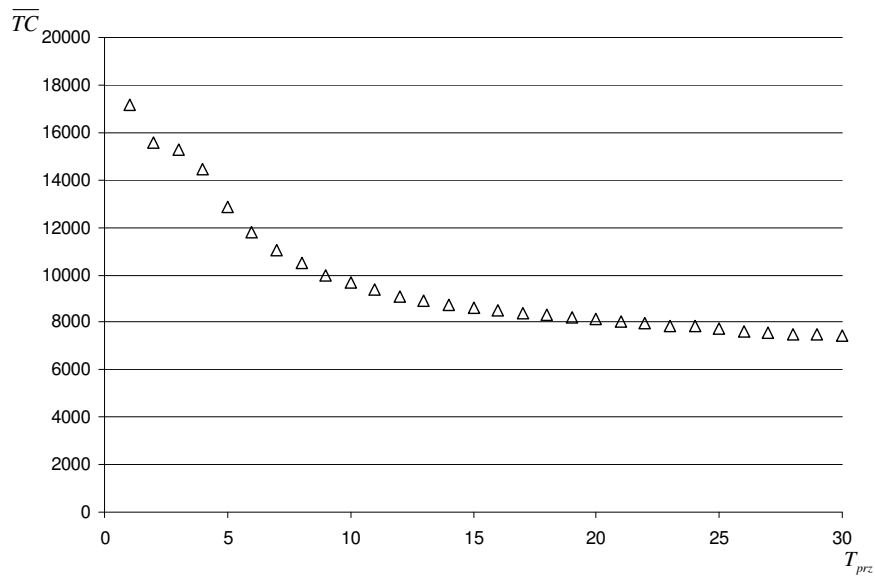
Rzadsze korygowanie stanów magazynowych skutkuje zwiększeniem średniej liczby braków w zapasie (rys. 7.39) i obniżeniem wskaźnika poziomu obsługi systemu eksploatacji. Mniejsza liczba obiektów pracujących w systemie eksploatacji prowadzi do zmniejszenia średniej liczby zwrotów do systemu.



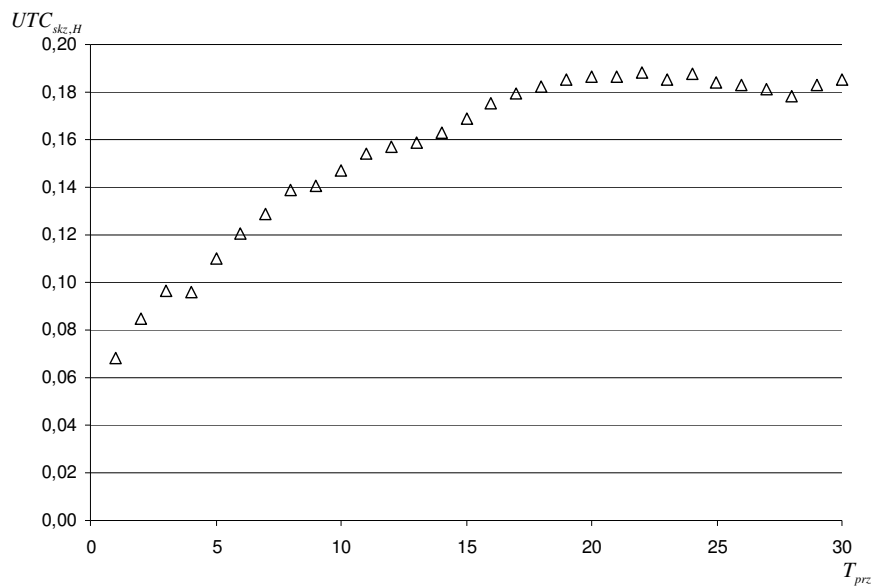
Rys. 7.39. Zmienność wartości średniej wielkości niezrealizowanego zapotrzebowania, w funkcji zmiany parametru T_{prz}

Mniejsza liczba uruchomień procesu odzysku sprawia, że średni stan zapasu w magazynie obiektów uszkodzonych utrzymuje się na poziomie zbliżonym do 1400 sztuk. Dla dłuższych okresów przeglądu ten stan jest utrzymywany wyłącznie przez zwroty do systemu oraz procesy odzysku. Można to zauważyć obserwując zmianę średniej wielkości partii w procesie unieszkodliwiania ($\bar{Q}_u = 0$ dla $T_{prz} > 3$).

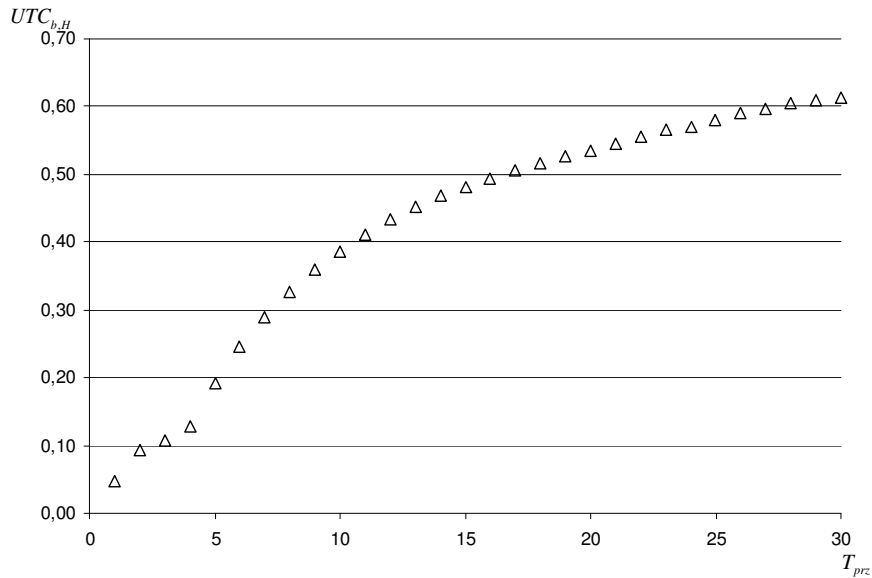
Wydłużenie okresu przeglądu wpływa również znacząco na poziom kosztów funkcjonowania systemu analizowanego. Wpływ badanego parametru na wybrane wyniki ekonomiczne przedstawiono na rysunkach 7.40 – 7.42. Przy założonych wartościach kosztów jednostkowych wydłużenie okresu przeglądu zmniejsza łączne koszty funkcjonowania systemu. Należy jednak zauważyć, iż zwiększa się znacznie udział kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania.



Rys. 7.40. Zmienność wartości średniej wielkości całkowitych kosztów funkcjonowania systemu, w funkcji zmiany parametru T_{prz}



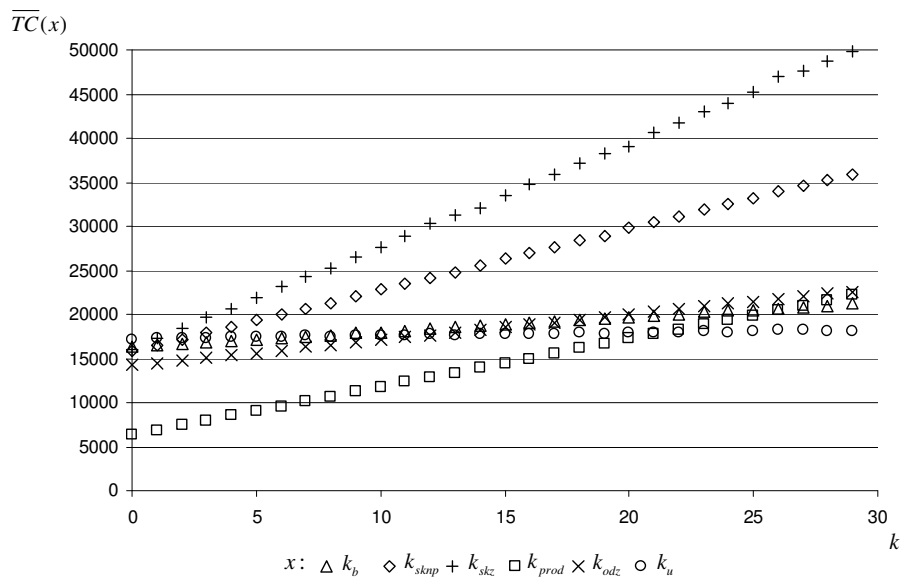
Rys. 7.41. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów składowania zwrotów, w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku, w funkcji zmiany parametru T_{prz}



Rys. 7.42. Zmienność wartości udziału łącznych kosztów niezrealizowanego zapotrzebowania w całkowitych kosztach funkcjonowania systemu odzysku w funkcji zmiany parametru T_{prz}

7.2.2. Parametry ekonomiczne systemu wsparcia logistycznego

Kolejnym etapem analizy wrażliwości modelu symulacyjnego jest uwzględnienie wpływu na całkowite koszty ponoszone przez system zmiany poszczególnych kosztów jednostkowych. Zmiana wartości dowolnego kosztu jednostkowego powoduje liniową zmianę łącznych kosztów funkcjonowania systemu wsparcia logistycznego \overline{TC} . Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunku 7.43.



Rys. 7.43. Zmienność wartości średniej kosztów całkowitych, w funkcji zmiany wartości kosztu jednostkowego, dla poszczególnych wartości kosztu jednostkowego k .

Przy założonych wartościach parametrów wejściowych, poziom całkowitych kosztów funkcjonowania systemu zależy przede wszystkim od poziomu jednostkowego kosztu składowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Dla wyjściowych wartości parametrów, wzrost jednostkowego kosztu składowania uszkodzonych obiektów, o jedną jednostkę, spowodowałby największy przyrost całkowitych kosztów funkcjonowania systemu. Znacznie mniejszy wpływ na wyniki ekonomiczne analizowanego modelu zaobserwowano dla jednostkowego kosztu składowania wyrobów finalnych oraz jednostkowego kosztu produkcji. Dla tych parametrów przyrost kosztów całkowitych jest podobny i o połowę mniejszy, niż dla jednostkowego kosztu składowania obiektów uszkodzonych. Najmniejszy wpływ na poziom łącznych kosztów funkcjonowania badanego systemu ma zmiana jednostkowego kosztu unieszkodliwiania. Nieznacznie większe znaczenie okazał się mieć jednostkowy koszt realizacji procesu odzysku oraz koszt kary związanej z wystąpieniem braku w zapasie wyrobów finalnych.

8. WERYFIKACJA MODELU SYSTEMU WSPARCIA LOGISTYCZNEGO PROCESU ZAGOSPODAROWANIA OBIEKTÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI

Istotnym elementem oceny opracowanego modelu systemu wsparcia logistycznego jest jego weryfikacja na podstawie danych uzyskanych z rzeczywistego systemu.

Ocenę zgodności rzeczywistych i modelowych wyników przeprowadzono na podstawie danych wybranego przedsiębiorstwa produkcyjnego, które w procesie wytwarzania nowych wyrobów wykorzystuje odzysk wartości, z obiektów wycofanych z eksploatacji. Zebrane dane zawierają informacje o liczbie obiektów sprzedawanych przez przedsiębiorstwo w okresie: od 01 stycznia 2007 r. do 30 września 2007 r. oraz zapis realizowanych procesów odzysku wartości z obiektów wycofanych z eksploatacji w okresie: od 25 stycznia 2007 r. do 29 lutego 2008 r. Do analizy wybrano grupę produktów składającą się z 39 wyrobów. Produkty pochodzące z jednej grupy charakteryzują się taką samą liczbą podstawowych elementów składowych. Komponenty wchodzące w skład wyrobów z tej samej grupy produktów są identyczne bądź różnią się nieznacznie.

8.1. Opis rzeczywistego systemu

Opisywane przedsiębiorstwo produkcyjne powstało w 1980 r. Główna siedziba firmy mieści się na Dolnym Śląsku. Produkty wytwarzane przez analizowane przedsiębiorstwo są eksportowane do 14 krajów Europy Zachodniej i Wschodniej.

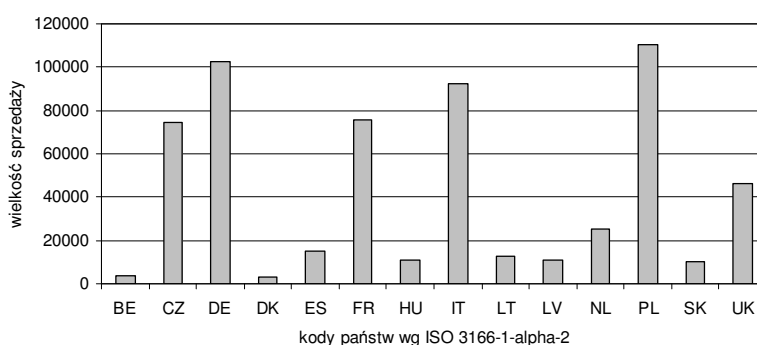
Przedsiębiorstwo wdraża zasady zrównoważonego rozwoju, już w fazie projektowania wyrobów, dążąc do zwiększenia możliwości ponownego wykorzystania zasobów oraz zmniejszania negatywnego wpływu na środowisko, procesów związanych z wytwarzaniem oraz eksploatacją produktów. Ponowne wykorzystanie elementów składowych produktów jest możliwe, między innymi dzięki modułowej budowie wyrobów oraz standaryzacji wykorzystywanych komponentów.

Zebrane dane zawierają informacje o wszystkich uszkodzeniach obiektów oraz o produktach, które zostały wycofane z eksploatacji. Obiekty wycofane z eksploatacji są zwracane do miejsca wytworzenia, pozostałe produkty są kierowane do lokalnych punktów serwisowych, przez które są naprawiane. Produkt jest zwracany do przedsiębiorstwa, jeżeli:

- a) ulegnie uszkodzeniu w fazie dystrybucji,
- b) uszkodzenie obiektu powstanie w krótkim czasie, od wprowadzenia do systemu eksploatacji,

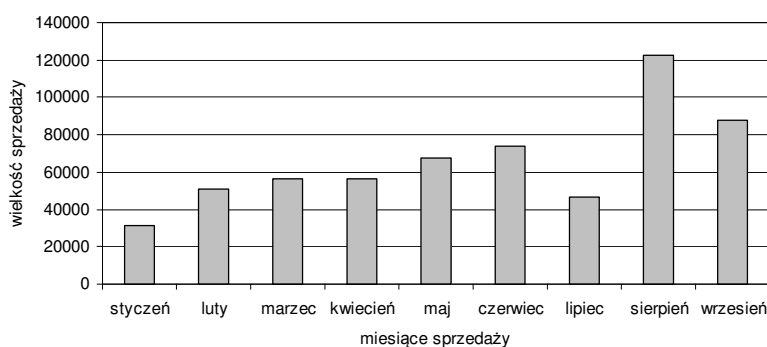
c) naprawa uszkodzonego obiektu nie może zostać wykonana przez lokalny punkt serwisowy.

Wszystkie analizowane produkty są wytwarzane przez przedsiębiorstwo na zlecenie. Pod koniec każdego miesiąca wyroby są wysyłane do lokalnych przedstawicieli, którzy sprzedają produkty. Przedsiębiorstwo pracuje w systemie trzymianowym przez 7 dni w tygodniu. Na wykresie 8.1 pokazano wielkość sprzedaży analizowanej grupy produktów do poszczególnych krajów. Z przedstawionego wykresu można odczytać, że najwięcej obiektów jest wprowadzanych do eksploatacji w Polsce, Niemczech, Włoszech, Francji oraz w Czechach. Zmianę wielkości sprzedaży dla wszystkich produktów, w poszczególnych miesiącach pokazano na rysunku 8.2. Liczba obiektów wprowadzanych do eksploatacji przez przedsiębiorstwo wzrasta w analizowanym okresie czasu. Wyjątkiem jest miesiąc lipiec, w którym sprzedano mniej wyrobów. Odnotowany spadek liczby sprzedanych obiektów jest spowodowany przerwą wakacyjną, podczas której znacznie ograniczono wielkość przyjmowanych zamówień.



Rys. 8.1. Wielkość sprzedaży analizowanej grupy produktów do poszczególnych krajów

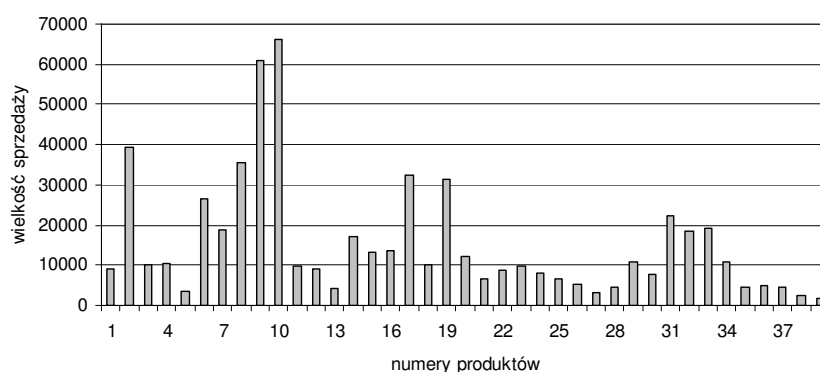
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa



Rys. 8.2. Wielkość sprzedaży analizowanej grupy produktów w poszczególnych miesiącach analizy

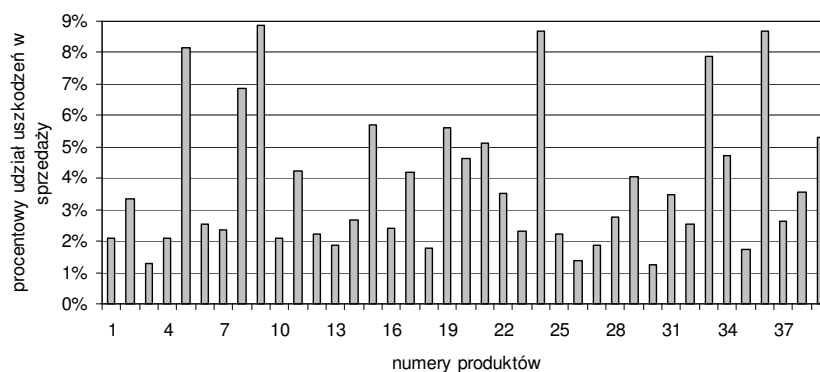
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

Wielkość sprzedaży jest inna dla różnych produktów. Na wykresie 8.3 pokazano łączną wielkość sprzedaży poszczególnych produktów, w okresie: od stycznia 2007 r. do września 2007 r. Kolejny wykres (rys. 8.4) pokazuje wyrażony w procentach stosunek liczby obiektów uszkodzonych do całkowitej sprzedaży danego produktu w analizowanym przedziale czasu. Porównując rysunki 8.3 oraz 8.4 można zauważyć, że w okresie objętym analizą najwięcej uszkodzeń odnotowano dla produktów o numerze 9, 8, 19 oraz 33. Liczba uszkodzeń wymienionych produktów przekraczała 1500 szt.



Rys. 8.3. Procentowy udział uszkodzeń poszczególnych produktów w ich sprzedaży

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

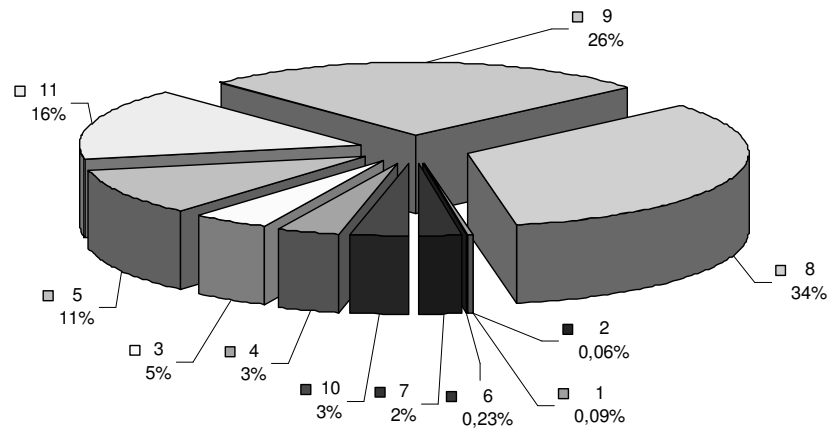


Rys. 8.4. Procentowy udział uszkodzeń poszczególnych produktów w ich sprzedaży

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

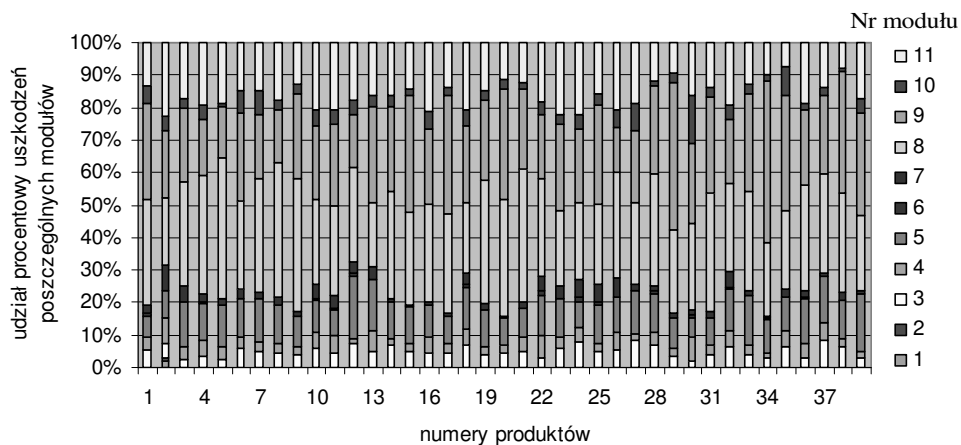
Każdy z analizowanych produktów składa się z 11 modułów. Uszkodzenie dowolnego modułu powoduje uszkodzenie produktu. Liczba uszkodzeń spowodowanych przez poszczególne komponenty została przedstawiona na rysunku 8.5. W analizowanym okresie odnotowano najwięcej uszkodzeń komponentów nr 8, 9, 11 oraz 5. Procentowy udział uszkodzeń spowodowanych przez te komponenty przekraczał 10% wszystkich uszkodzeń.

Najbardziej przyczyną uszkodzenia były komponenty nr 1, 2 oraz 6. Pozostałe komponenty cechuje zbliżony udział procentowy uszkodzeń. Interesujący jest fakt, że procentowy udział uszkodzeń spowodowanych przez poszczególne komponenty jest inny dla różnych produktów. Zależność tą przedstawiono na wykresie 8.6. Zauważono również, że procentowy udział uszkodzeń w sprzedaży jest różny dla poszczególnych krajów (rys. 8.7).



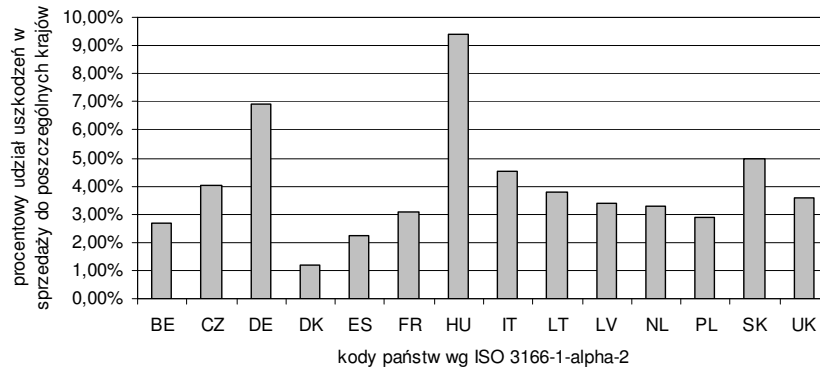
Rys. 8.5. Procentowy udział uszkodzeń spowodowanych przez poszczególne komponenty (dla wszystkich produktów)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa



Rys. 8.6. Procentowy udział uszkodzeń spowodowanych przez poszczególne komponenty

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

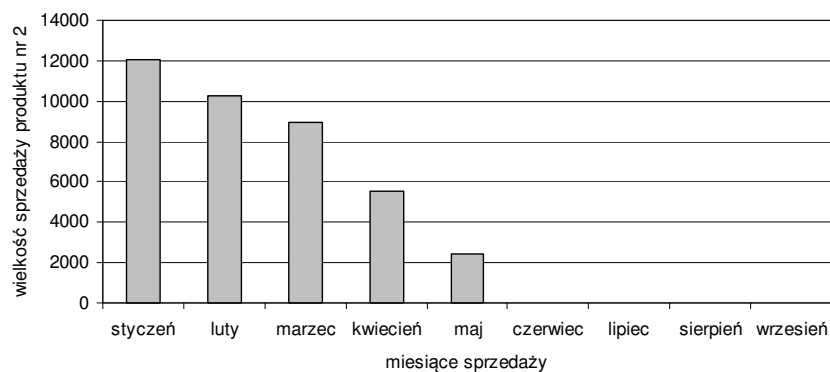


Rys. 8.7. Procentowy udział uszkodzeń w sprzedaży do poszczególń krajów

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

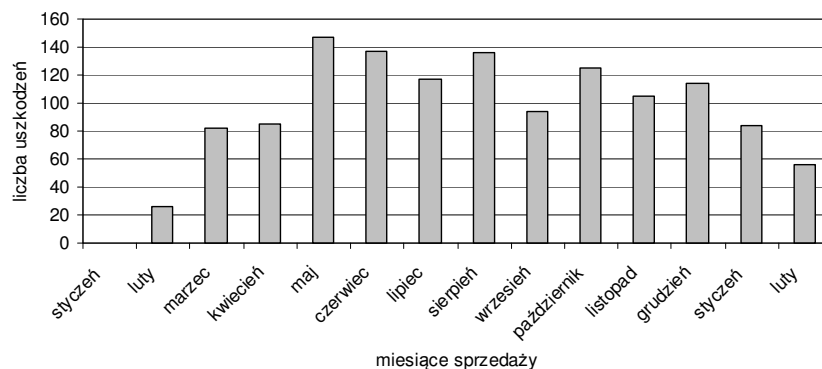
8.2. Analiza zgodności danych rzeczywistych oraz uzyskanych w procesie symulacji

Dane uzyskane z rzeczywistego systemu produkcyjnego pozwalają na weryfikację opracowanego modelu symulacyjnego, w zakresie wyznaczania liczby obiektów zwracanych do systemu. Do analizy zgodności wybrano produkt nr 2, ze względu na stosunkowo dużą liczbę danych o uszkodzeniach tego produktu. Na wykresie 8.8 przedstawiono liczbę obiektów nr 2, które zostały wprowadzone do systemu eksploatacji w okresie objętym analizą. Wybrany produkt był sprzedawany do maja 2007 r. Na wykresie 8.9 pokazano liczbę obiektów nr 2 uszkodzonych w okresie: od 25 stycznia 2007 r. do 29 lutego 2008 r. W analizowanym okresie wszystkie zwroty produktu nr 2 były spowodowane uszkodzeniami, które wystąpiły w procesie eksploatacji obiektów. Wykres 8.10 przedstawia liczbę uszkodzeń spowodowanych przez poszczególne komponenty.



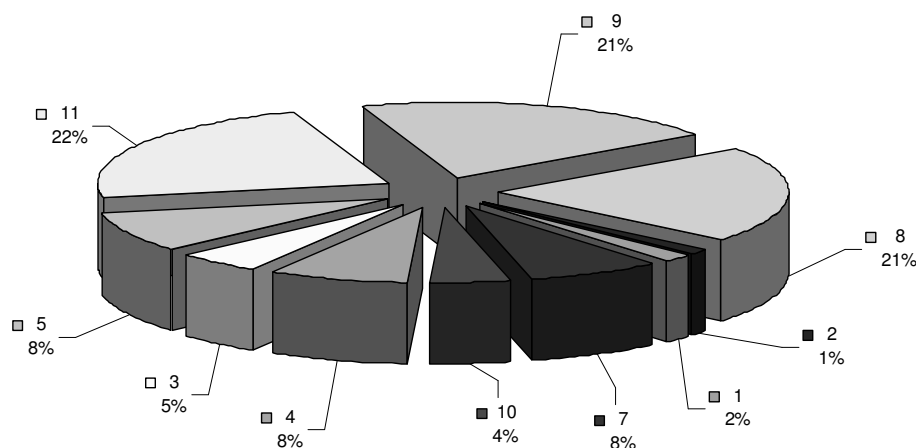
Rys. 8.8. Liczba obiektów nr 2 wprowadzonych do systemu eksploatacji w okresie objętym analizą

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa



Rys. 8.9. Liczba uszkodzeń obiektów nr 2 w okresie objętym analizą

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa



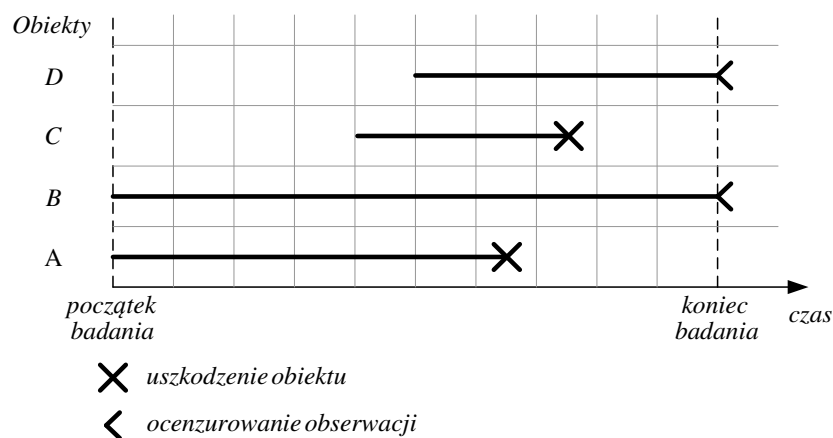
Rys. 8.10. Procentowy udział uszkodzeń obiektów nr 2 spowodowanych przez poszczególne komponenty

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych przedsiębiorstwa

Do zamodelowania procesu funkcjonowania rzeczywistego systemu niezbędne jest wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia analizowanego obiektu technicznego. Podczas analizy wrażliwości założono, że chwila opuszczenia fabryki przez produkt jest chwilą wprowadzenia obiektu do systemu eksploatacji. W rzeczywistości chwila uruchomienia obiektu jest przesunięta w czasie o kilka dni od momentu opuszczenia fabryki. Uzyskane dane nie zawierają informacji o dokładnych chwilach uruchomienia wszystkich produktów.

W celu oszacowania parametrów rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas do uszkodzenia obiektu pracującego w systemie technicznym wykorzystano oprogramowanie Weibull++ ver. 6.0.9. Czas do uszkodzenia wyrażono w liczbie dni.

Ponieważ badanie obiektów technicznych zostało zakończone 29 lutego 2008 r., część obserwacji została ucięta. Wykorzystane oprogramowanie umożliwia analizę danych cenzurowanych. Schemat przebiegu obserwacji przedstawia rysunek 8.11. Parametry rozkładu prawdopodobieństwa oszacowano metodą *Maximum Likelihood*. Dopasowany został trójparametrowy rozkład Weibulla. Oszacowane wartości parametrów przedstawiono w tabeli 8.1. Natomiast uzyskane funkcje rozkładów prawdopodobieństwa pokazano na rysunkach 8.12 – 8.14.

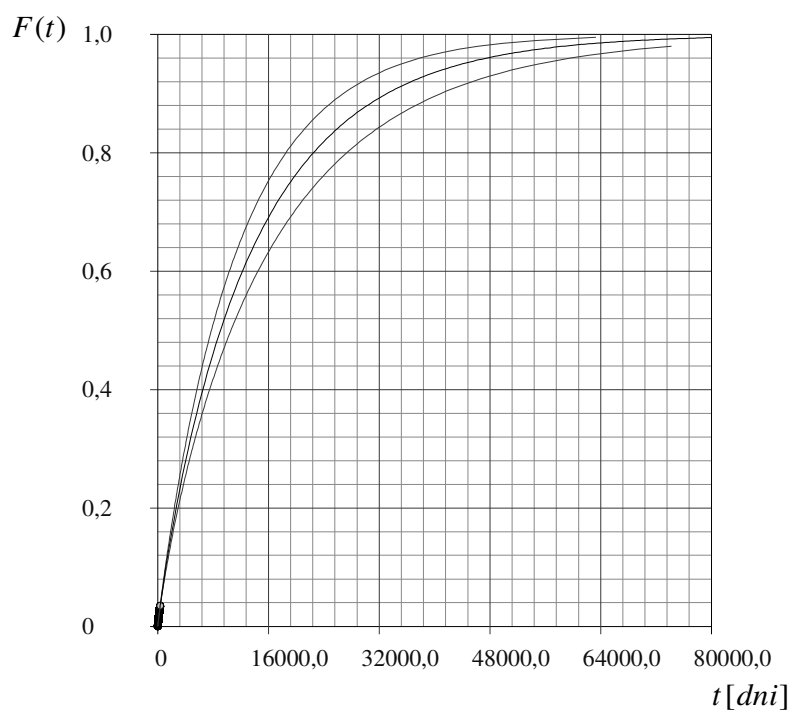


Rys. 8.11. Schemat przebiegu obserwacji obiektów w systemie rzeczywistym

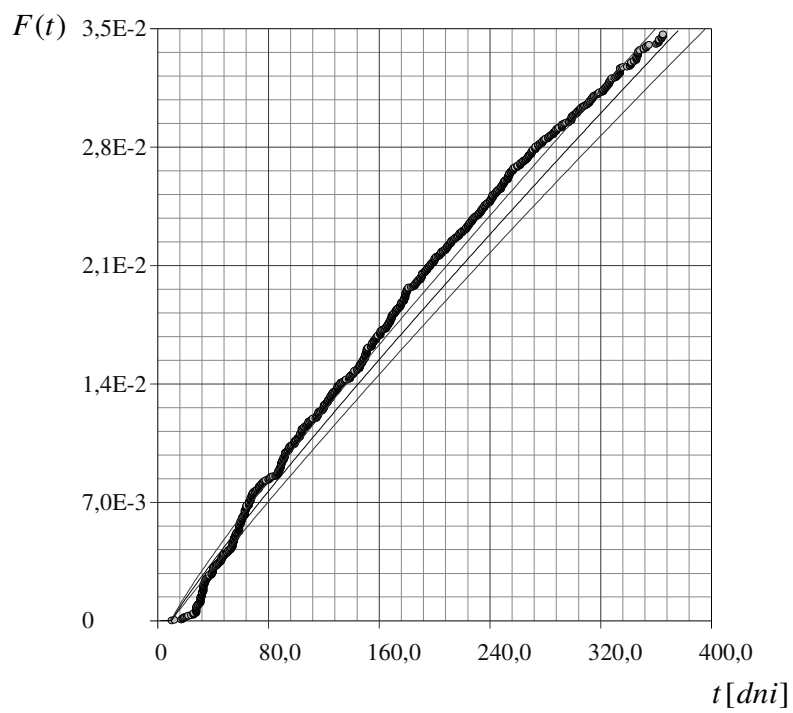
Źródło: Opracowanie własne

Tabela 8.1. Parametry rozkładu prawdopodobieństwa opisującego czas do uszkodzenia obiektów w systemie rzeczywistym.

Parametry rozkładu	Metoda	Opis
	<i>Maximum Likelihood</i>	
α_r	13455	parametr skali rozkładu
β_r	0.9260	parametr kształtu rozkładu
γ_r	9.9750	parametr położenia rozkładu



Rys. 8.12. Funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia (rozkład Weibulla)



Rys. 8.13. Funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia (rozkład Weibulla, początek układu współrzędnych)

Dla przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa i zmiennej wartości parametru τ_{dop} przeprowadzono symulacje oraz wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe liczby obiektów zwróconych do systemu odzysku w poszczególnych miesiącach. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach 8.15 – 8.19. Dla każdej z uzyskanych wartości przeprowadzono test istotności dla dwóch wartości oczekiwanych. Na poziomie istotności $\alpha = 0,02$ weryfikacji poddano hipotezę:

$$H_0 : m_1 = m_2, \quad (8.1)$$

wobec hipotezy alternatywnej:

$$H_1 : m_1 \neq m_2, \quad (8.2)$$

gdzie:

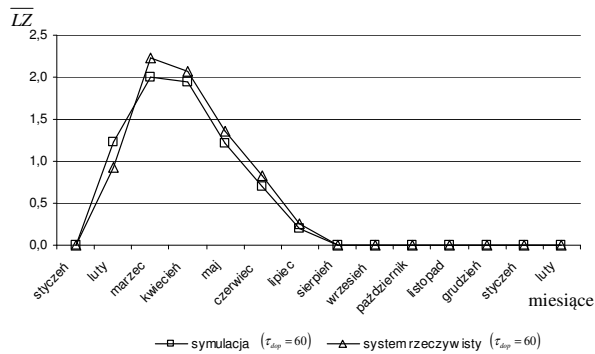
m_1, m_2 - porównywane wartości średnie w dwóch populacjach.

W analizowanym przypadku wartość średnia oraz odchylenie standardowe populacji są nieznane. Ponieważ łączna liczebność prób ($n_1 + n_2$) jest mniejsza od 122, do weryfikacji hipotezy $H_0 : m_1 = m_2$ wykorzystano następujący test [45, 137]:

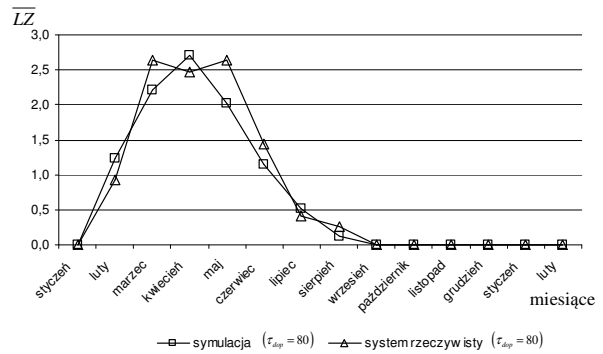
$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}. \quad (8.3)$$

Przy założeniu, że odchylenia standardowe w obu populacjach są identyczne, jeżeli hipoteza zerowa jest prawdziwa, to statystyka opisana powyższym wzorem ma rozkład Studenta o $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody [45, 137]. Ponieważ $n_1 = n_2 = n$, przedstawiony wzór można zapisać w następujący sposób:

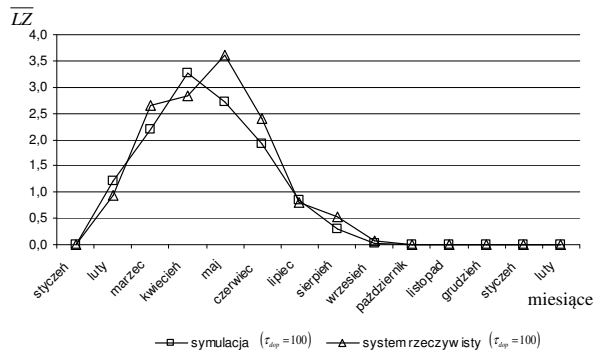
$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n-1}}}. \quad (8.4)$$



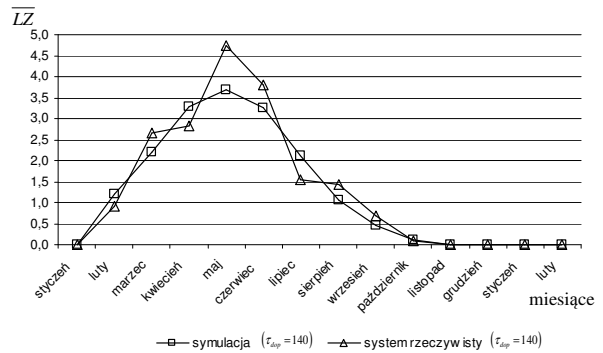
Rys. 8.14. Średnia liczba obiektów zwracanych do systemu, w poszczególnych miesiącach, dla $\tau_{dop} = 60$ (Rozkład Weibulla)



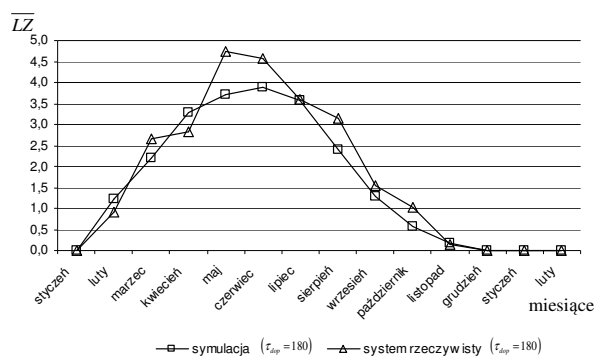
Rys. 8.15. Średnia liczba obiektów zwracanych do systemu, w poszczególnych miesiącach, dla $\tau_{dop} = 80$ (Rozkład Weibulla)



Rys. 8.16. Średnia liczba obiektów zwracanych do systemu, w poszczególnych miesiącach, dla $\tau_{dop} = 100$ (Rozkład Weibulla)



Rys. 8.17. Średnia liczba obiektów zwracanych do systemu, w poszczególnych miesiącach, dla $\tau_{dop} = 140$ (Rozkład Weibulla)



Rys. 8.18. Średnia liczba obiektów zwracanych do systemu, w poszczególnych miesiącach, dla $\tau_{dop} = 180$ (Rozkład Weibulla)

Wartości statystyki t wyznaczone dla wyników otrzymanych w procesie symulacji dla różnych wartości parametru τ_{dop} . Obliczone wartości przedstawiono w tabeli 8.2. Na podstawie obliczonych wartości statystyki t można jednoznacznie stwierdzić, że na poziomie istotności $\alpha=0,02$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności wyników otrzymanych z systemu rzeczywistego oraz z procesu symulacji.

Tabela 8.2. Wartości statystyki $|t|$ w zależności od parametru τ_{dop} (Rozkład Weibulla)

	$ t =$	Wartości parametru τ_{dop}					n	$t_{0,02;2n-2}$
		$\tau_{dop} = 60$	$\tau_{dop} = 80$	$\tau_{dop} = 100$	$\tau_{dop} = 140$	$\tau_{dop} = 180$		
Styczeń	$ t =$						12	2,508
Luty	$ t =$	0,623	0,647	0,575	0,593	0,633	28	2,397
Marzec	$ t =$	0,336	0,585	0,630	0,594	0,628	31	2,390
Kwiecień	$ t =$	0,194	0,357	0,580	0,598	0,586	30	2,392
Maj	$ t =$	0,418	1,443	1,273	1,249	1,204	31	2,390
Czerwiec	$ t =$	0,893	1,213	1,035	0,859	0,846	30	2,392
Lipiec	$ t =$	0,620	0,769	0,181	2,155	0,105	31	2,390
Sierpień	$ t =$		1,750	1,675	1,446	1,476	31	2,390
Wrzesień	$ t =$			0,830	1,406	0,924	30	2,392
Październik	$ t =$				0,045	1,221	31	2,390
Listopad	$ t =$					0,569	30	2,392
Grudzień	$ t =$						31	2,390
Styczeń	$ t =$						31	2,390
Luty	$ t =$						29	2,395

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podstawowym celem pracy było opracowanie modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Postawiony cel został zrealizowany poprzez wykonanie następujących zadań cząstkowych:

- sformułowanie podstawowych definicji związanych z opracowanym modelem wsparcia logistycznego;
- przyjęcie założeń teoretycznych opisujących modelowany system;
- opracowanie modelu prognostycznego;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu prognostycznego;
- opracowanie analitycznego modelu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu analitycznego na zmianę wartości podstawowych parametrów wejściowych modelu;
- opracowanie modelu symulacyjnego;
- analizę zgodności wyników uzyskanych w procesie symulacji z wynikami wyznaczonymi analitycznie;
- analizę wrażliwości opracowanego modelu symulacyjnego na zmianę wartości podstawowych parametrów wejściowych modelu;
- weryfikację modelu symulacyjnego w oparciu o dane rzeczywistego systemu.

Opracowany model może zostać wykorzystany do analizy zagadnień związanych z procesem zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Umożliwia między innymi:

- wybór najlepszych parametrów systemu, które przy założonym poziomie realizacji zgłaszanego zapotrzebowania, pozwalają na obniżenie kosztów funkcjonowania systemu;
- ocenę funkcjonującego systemu;
- oszacowanie wielkości strumienia zwrotów.

Opracowanie i analiza modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Analiza wrażliwości modelu symulacyjnego na zmianę parametrów polityki utrzymania zapasów wykazała ich znaczący wpływ na uzyskane wyniki. Wybór

optymalnych wartości omawianych parametrów jest uzależniony przede wszystkim od wielkości zapotrzebowania na nowe obiekty oraz cech niezawodnościowych obiektu technicznego. W procesie analizy wrażliwości wykazano istotne znaczenie parametrów niezawodnościowych obiektu technicznego.

- Badanie wielkości zapasu, wyznaczającego chwilę uruchomienia procesu odzysku oraz produkcji, potwierdziło jego wpływ na uzyskane wyniki. Przy założonych wartościach parametrów wejściowych modelu, wartość parametru s wpływa istotnie na poziom zapasu utrzymywanego w magazynie wyrobów finalnych.
- Wykazano, że istotne znaczenie w procesie zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji ma wartość poziomu informacyjnego s_u . Parametr ten wyznacza maksymalną pojemność magazynu zwrotów. Przy założonej polityce utrzymania zapasów wartość parametru s_u wpływa na możliwość uruchomienia procesu odzysku.
- Pokazano, że długość okresu przeglądu ma istotne znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania analizowanego systemu. Wydłużenie okresu przeglądu w opracowanym modelu zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia braku w zapasie wyrobów finalnych.

Powyższe wnioski potwierdzają poprawne działanie opracowanego modelu. Przeprowadzona analiza pozwala również na sformułowanie mniej oczywistych, a mających istotne znaczenie, w procesie zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji, wniosków takich jak:

- Przedstawiona analiza wpływu zmiany dopuszczalnego czasu do uszkodzenia τ_{dop} na wyniki opracowanego modelu potwierdziła znaczący wpływ tego parametru. W zależności od τ_{dop} można zdefiniować wielkość partii odzysku, która pozwoli na pełne wykorzystanie obiektów zwracanych do systemu, poprzez zminimalizowanie liczby obiektów poddawanych unieszkodliwianiu.
- Przedstawiona analiza pokazuje, że dobór odpowiednich wartości parametrów Q_{odz} oraz Q_{prod} ma istotny wpływ na proces zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Ustalenie odpowiednich wartości partii odzysku oraz produkcji pozwala na osiągnięcie wysokiego poziomu wykorzystania obiektów wycofanych z eksploatacji, zwiększenie poziomu obsługi oraz zachowanie niskich kosztów funkcjonowania systemu.

- W procesie analizy wrażliwości modelu symulacyjnego na zmianę wartości poszczególnych kosztów jednostkowych wykazano, że przy założonych wartościach parametrów wejściowych, poziom całkowitych kosztów funkcjonowania systemu zależy przede wszystkim od poziomu jednostkowego kosztu składowania obiektów wycofanych z eksploatacji. Znacznie mniejszy wpływ na wyniki ekonomiczne analizowanego modelu zaobserwowano dla jednostkowego kosztu składowania wyrobów finalnych oraz jednostkowego kosztu produkcji. Najmniejszy wpływ na poziom łącznych kosztów funkcjonowania badanego systemu ma zmiana jednostkowego kosztu unieszkodliwiania. Nieznacznie większe znaczenie okazał się mieć jednostkowy koszt realizacji procesu odzysku oraz koszt kary związanej z wystąpieniem braku w zapasie wyrobów finalnych.

Możliwy jest dalszy rozwój opracowanego modelu systemu wsparcia logistycznego procesu zagospodarowania obiektów wycofanych z eksploatacji poprzez uwzględnienie:

- parametrów związanych z procesem zbiórki oraz transportu obiektów wycofanych z eksploatacji. Szczególnie istotne może okazać się uwzględnienie różnych źródeł zwrotów;
- możliwości dostarczania zwrotów w partiach;
- dłuższych niż jeden okres czasów realizacji procesów odzysku oraz produkcji;
- losowych czasów odzysku;
- złożonej struktury niezawodnościowej obiektów technicznych.

LITERATURA

- [1] Bayindir Z. P., Teuner R. H., Dekker R., *A comparison of Inventory Control Policies for a Joint Manufacturing/Remanufacturing Environment with Remanufacturing Yield Loss*, Proceedings of the 13th International Symposium on Inventories, Budapest, Hungary, 2004.
- [2] Bendkowski J., Wengierek M., *Logistka odpadów, Tom I, Procesy logistyczne w gospodarce odpadami*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
- [3] Bendkowski J., Wengierek M., *Logistka odpadów, Tom II, Obiekty gospodarki odpadami*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [4] Bhattacharya S., Guide Jr. V. D. R., Van Wassenhove L. N., *Closed-Loop Supply Chains: An Introduction to the Feature Issue*, Production and Operations Management, Vol. 15, No. 3, 2006, s. 421-431.
- [5] Brdulak H., Michniewska K., *ZIELONA logistyka, ekologistyka, zrównoważony rozwój w logistyce*, Logistyka, Vol. 4, 2009, s. 8-15.
- [6] Buchanan D. J., Abad P. L., *Optimal policy for periodic review returnable inventory system*, IIE Transactions, Vol. 30, 1998, 1049-1055.
- [7] Cheung K. L., Hausman W. H., *A Multiechelon Inventory Model with Multiple Failures*, Naval Research Logistics, Vol. 40, 1993, s. 593-602.
- [8] Clegg A. J., Williams D. J., *Production planning for companies with remanufacturing capability*, Proceedings of the 1995 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Orlando FL, 1995, s. 186-191.
- [9] Cohen M. A., Nahmias S., Pierskalla W. P., *A dynamic inventory system with recycling*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 27, No.2, 1980, s. 289-296.
- [10] Corbacioğlu U., van der Laan E. A., *Setting the holding cost rates in two-product system with remanufacturing*, International Journal of Production Economics, Vol. 109, 2007, s. 185-194.
- [11] De Brito M. P., Dekker R., *Modelling product returns in inventory control-exploring the validity of general assumptions*, International Journal of Production Economics, Vol. 81-82, 2003, s. 225-241.
- [12] De Brito M. P., van der Laan E. A., *Inventory Control with product returns: the impact of (mis)information*, Econometric Institute Report EI 2002-29, Faculty of Economics, Erasmus University Rotterdam, the Netherlands, 2002.

- [13] DeCroix G. A., *Optimal Policy for a Multiechelon Inventory System with Remanufacturing*, Operations Research, Vol. 54, No. 3, 2006, s. 532-543.
- [14] DeCroix G. A., Zipkin P. H., *Inventory Management for an Assembly System with Product or Component Returns*, Management Science, Vol. 51, No. 8, 2005, s. 1250-1265.
- [15] Dekker R., Fleischmann M., Inderfurth K., Van Wassenhove L.N., *Reverse Logistics, Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [16] Devroye, L., *Non-Uniform Random Variate Generation*, Springer-Verlag, 1986.
- [17] Diaz A., Fu M. C., *Multi-echelon models for repairable items: A review*, Decision & Information Technologies Research Works Collection, Digital Repository at the University of Maryland, 2005.
- [18] Dobos I., Richter K., *An extended production/recycling model with stationary demand and return rates*, International Journal of Production Economics, Vol. 90, 2004, s.311–323.
- [19] Dobos I., Richter K., *A production/recycling model with quality consideration*, International Journal of Production Economics, Vol.104, 2006, s. 571–579.
- [20] Dobos I., Richter K., *A production/recycling model with stationary demand and return rates*, Central European Journal of Operations Research, Vol. 11, 2003, s. 35–46.
- [21] Dobos I., Richter K., *The integer EOQ repair and waste disposal model – Further analysis*, Central European Journal of Operations Research, Vol. 8, 2000, s. 173–194.
- [22] Dobos I., *The generalization of Schrady's model: a model with repair*, Working Paper No. 7, Department of Business Economics, Budapest University of Economics and Public Administration, 2002.
- [23] Dong Y., Kaku I., Tang J., *Inventory Management in Reverse Logistics: A Survey*, Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on Services Systems and Services Management, Chongqing, China, Vol. 1, 2005, s. 352-356.
- [24] El Saadany A., Jaber M. Y., *The EOQ repair and waste disposal model with switching costs*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 55, 2008, s. 219–233.
- [25] Endoh S., Hoshino S., Fujiwara H., Okazaki T., Haruki K., Shibata S., Itoi Y., Uesugi H., Wada Y., Terui H., Inoko M., Mitsuishi G., *Study of Inverse Supply Chain (1), Survey of Actual Inverse Supply Chain in Japan*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 527-532.

- [26] Ferguson M., Guide Jr. V. D. R., Souza G. C., *Supply Chain Coordination for False Failure Returns*, Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 8, No. 4, 2006, s. 376-393.
- [27] Fisher W. W., Brennan J. J., *The Performance of Cannibalization Policies in a Maintenance System with Spares, Repair, and Resource Constraints*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 33, 1986, s. 1-15.
- [28] Fisher W. W., *Markov Process Modeling of a Maintenance System with Spares, Repair, Cannibalization and Manpower Constraints*, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 13, No. 7, 1990, s. 119-125.
- [29] Fleischmann M., Bloemhof-Ruwaard J. M., Dekker R., van der Laan E., van Nunen J. A. E. E., van Wassenhove L. N., *Quantitative models for reverse logistics: A review*, European Journal of Operational Research, Vol. 103, 1997, s. 1-17.
- [30] Fleischmann M., Dekker R., Kuik R., *Controlling inventories with stochastic item returns: A basic model*, European Journal of Operational Research, Vol. 138, 2002, s. 63-75.
- [31] Fleischmann M., Krikke H. R., Dekker R., Flapper S. D. P., *A characterization of logistics networks for product recovery*, Omega, Vol. 28, 2008, s. 653-666.
- [32] Fleischmann M., Kuik R., *On optimal inventory control with independent stochastic item returns*, European Journal of Operational Research, Vol. 151, 2003, s. 25-37.
- [33] Fleischmann M., van Nunen J., Gräve B., Gapp R., *Reverse Logistics – capturing Value in the Extended Supply Chain*, ERIM Report Series Research in Management, ERS-2004-091-LIS, 2004.
- [34] Fleischmann M., van Nunen J., Gräve B., *Integrating Closed-Loop Supply Chains and Spare Parts Management at IBM*, Interfaces, Vol. 33, No. 6, 2003, s. 44-56.
- [35] Franke C., Basdere M., Ciupek M., Seliger S., *Remanufacturing of mobile phones- capacity, program and facility adaptation planning*, Omega, Vol. 34, 2006, s. 562-570.
- [36] Fujimoto H., Ahmed A. Sugi K., *Product's disassemblability evaluation using Information Entropy*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s.353-358.
- [37] Golembaska E. (red.), *Kompendium wiedzy o logistyce*, PWN, Warszawa-Poznań, 1999.
- [38] Guide Jr. V. D. R., Jayaraman V., Srivastava R., *Production planning and control for remanufacturing: a state-of-the-art survey*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 15, 1999, s. 221-230.

- [39] Guide Jr. V.D.R., Kraus M.E., Srivastava R., *Scheduling policies for remanufacturing*, International Journal of Production Economics, Vol. 48, 1997, s. 187-204.
- [40] Guide Jr. V.D.R., *Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs*, Journal of Operations Management, Vol. 18, 2000, s. 476-483.
- [41] Guide Jr. V.D.R., *Scheduling using drum-buffer-ropo in a remanufacturing environment*, International Journal of Production Research, Vol. 34, 1996, s. 1081-1091.
- [42] Guide Jr. V. D. R., Souza G. C., Van Wassenhove L. N., Blackburn J. D., *Time Value of Commercial Product Returns*, Management Science, Vol. 52, No. 8, 2006, s. 1200-1214.
- [43] Guide Jr. V. D. R., Srivastava R., *Repairable inventory theory: Models and applications*, European Journal of Operational Research, Vol. 102, 1997, s. 1-20.
- [44] Gupta S. M., Taleb K. M., *Scheduling disassembly*, International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 8, 1994, s. 1857-1866.
- [45] Hellwig Z., *Elementy rachunku prawdopodobieństwa I statystyki matematycznej*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1995.
- [46] Heyman D. P., *Optimal disposal policies for a single-item inventory system with returns*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 24, 1997, s. 385-405.
- [47] Hirsch W. M., Meisner M., Boll C., *Cannibalization in Multi-component System and the Theory of Reliability*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 15, 1968, s. 331-359.
- [48] Hochberg M., *Generalized Multi-component System under Cannibalization*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 20, 1973, s. 585-605.
- [49] Hoffmann B., Kopacek B., Kopacek P., Knoth R., *Design for Re-use Disassembly*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 378-381.
- [50] Hwang H., Oh Y. H., *Deterministic inventory model for recycling system*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 17, 2006, s. 423-428.
- [51] Ichino S., *Recycling- production and assessment of Fuji Film one time use camera "Quick Snap"*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 507-510.
- [52] Ijomah W. L., McMahon A., Hammond P., Newman S. T., *Development of design remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, 2007, s. 712-719.

- [53] Inderfurth K., de Kok A. G., Flapper S. D. P., *Product recovery in stochastic remanufacturing system with multiple reuse options*, European Journal of operational research, Vol. 133, 2001, s. 130-152.
- [54] Inderfurth K., Janiak A., Kovalyov M. Y., Werner F., *Batching Work and Rework Processes with Limited Deterioration of Reworkables*, Computers and Operations Research, Vol. 33, No. 6, 2006, s. 1595-1605.
- [55] Inderfurth K., Lindner G., Rachaniotis N. P., *Lot sizing in a production system with rework and product deterioration*, International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 7, 2005, s. 1355-1374.
- [56] Inderfurth K., *Optimal policies in hybrid manufacturing/remanufacturing system with product substitution*, International Journal of Production Economics, Vol. 90, 2004, s. 325-343.
- [57] Inderfurth K., *Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes*, OR Spektrum, Vol. 19, 1997, s. 111-122.
- [58] Inderfurth K., van der Laan E., *Leadtime effects and policy improvement for stochastic inventory control with remanufacturing*, International Journal of Production Economics, Vol. 71, 2001, s. 381-390.
- [59] Jaber M. Y., El Saadany A. M. A., *The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales*, International Journal of Production Economics, Vol. 120, 2009, s. 115-124.
- [60] Jaber M. Y., Rosen M. A., *The economic order quantity repair and waste disposal model with entropy cost*, European Journal of Operational Research, Vol. 188, 2008, s. 109–120.
- [61] Jiang Z. H., Shu L. H., Benhabib B., *Reliability Analysis of Non-Constant-Size Part Populations in Design for Remanufacture*, Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 122, No. 2, 2000, s. 172-178.
- [62] Kang H. Y., Jung J. W., *Recycling Oriented Design – A Case Study on House Appliances Using the Software ATROiD*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 309-314.
- [63] Kasmara A., Muraki M., Matsuoka S., Sukoyo, Suryadi K., *Production planning in remanufacturing/manufacturing production system*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 708-713.

- [64] Kelle P., Silver E. A., *Purchasing Policy of New Containers Considering the Random Returns of Previously Issued Container*, IIE Transactions, Vol. 21, No. 4, 1989, s. 349-354.
- [65] Kennedy W. J., Patterson J. W., Fredendall L. D., *An overview of recent literature on spare parts inventories*, International Journal of Productions Economics, Vol. 76, 2002, s. 201-215.
- [66] Kiesmüller G. P., *A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes*, European Journal of Operational Research, Vol. 147, 2003, s. 62-71.
- [67] Kiesmüller G. P., Minner S., *Simple expression for finding recovery system inventory control parameter values*, Journal of Operational Research Society, Vol. 54, 2003, s. 83-88.
- [68] Kiesmüller G. P., *Optimal control of a one product recovery system with leadtimes*, International Journal of Production Economics, Vol. 81-82, 2003, s. 333-340.
- [69] Kiesmüller G. P., Scherer C. W., *Computational issues in a stochastic finite horizon one product recovery inventory model*, European Journal of Operational research, Vol. 146, 2003, s. 553-579.
- [70] Kiesmüller G. P., van der Laan E. A., *An inventory model with dependent product demands and returns*, International Journal of Production Economics, Vol. 72, 2001, s. 73-87.
- [71] Kim K., Song I., Kim J., Jeong B., *Supply planning model for remanufacturing system In reverse logistics environment*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 51, 2006, s. 279-287.
- [72] Kimura F., Hata T., Suzuki H., *Product Quality Evaluation Based on Behaviour Simulation of Used Products*, Annals of the CIRP, Vol.47, No. 1, 1998, s. 119-122.
- [73] Kleber R., Minner S., Kiesmüller G., *A continuous time inventory model for a product recovery system with options*, International Journal of Production Economics, Vol. 79, 2002, s. 121-141.
- [74] Knight W. A., Sodhi M., *Design for Bulk Recycling: Analysis of Materials Separation*, Annals of the CIRP, Vol. 49, No. 1, 2000, s.83-86.
- [75] Knoth R., Hoffman M., Kopacek B., Kopacek P., *Intelligent Disassembly of Elect(on)ic Equipment*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 557-561.

- [76] Knoth R., Hoffman M., Kopacek B., Kopacek P., *Re-use of End-of-Life Electronic Equipment and Components – Logistic Aspect*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 692-695.
- [77] Koh S. G., Hwang H., Sohn K. I., Ko C. S., *An optimal ordering and recovery policy for reusable items*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 43, 2002, s. 59–73.
- [78] Konstantaras I., Papachristos S., *A note on: Developing an exact for an inventory system with product recovery*, International Journal of production economics, Vol.111, 2008, s. 707-712.
- [79] Konstantaras I., Papachristos S., *Lot-sizing for a single-product recovery system with backordering*, International Journal of Production Research, Vol. 44, 2006, s. 2031-2045.
- [80] Konstantaras I., Papachristos S., *Optimal policy and holding cost stability regions in a periodic review inventory system with manufacturing and remanufacturing options*, European Journal of Operational Research, Vol. 178, 2007, s. 433-448.
- [81] Korugan A., Gupta S. M., *A Multi-Echelon Inventory System with Returns*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 53, No.1-2, 1998, s. 145-148.
- [82] Kurasawa K., Murayama H., Kato Y., Ohtani M., Kanetani K., Satoh T., *Development of Environmentally Friendly Energy-efficient Copier*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s.198-201.
- [83] Korzeń Z., *Ekologistyka*, Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania Poznań, 2001.
- [84] Korzeniowski A., Skrzypek M., *Ekologistyka zużytych opakowań*, Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań, 1999.
- [85] Mabini M. C., Gelders L. F., *Repairable item inventory systems: A literature review*, Belgian Journal Operations Research, Statistics and Computer Science, Vol. 30, No. 4, 1991, s. 58-69.
- [86] Mabini M. C., Pintelon L. M., Gelders L. F., *EOQ type formulations for controlling repairable inventories*, International Journal of Production Economics, Vol. 28, 1992, s. 21-33.
- [87] Mahadevan B., Pyke D. F., Fleischmann M., *Periodic review, push inventory policies for remanufacturing*, European Journal of Operational Research, Vol. 151, 2003, s. 536-551.

- [88] Merkisz-Guranowska A., *Aspekty rozwoju recyklingu w Polsce*, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań – Radom, 2005.
- [89] Merkisz-Guranowska A., *Recykling samochodów w Polsce*, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań – Radom, 2007.
- [90] Migdalski J. (red.), *Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne*, Wyd. WEMA, Warszawa, 1982.
- [91] Minner S., Kleber R., *Optimal control of production and remanufacturing in a simple recovery model with linear cost functions*, OR Spectrum, Vol. 23, 2001, s. 3-24.
- [92] Minner S., *Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains*, International Journal of Production Economics, Vol. 71, 2001, s. 417-428.
- [93] Mitra S., *Analysis of a two-echelon inventory system with returns*, Omega, Vol. 37, 2009, s. 106-115.
- [94] Mostard J., de Koster R., Teuner R., *The distribution-free newsboy problem with resalable returns*, International Journal of Production Economics, Vol. 97, 2005, s. 329-342.
- [95] Muckstadt J. A., *A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system*, Management Science, Vol. 20, No. 4, Part. 1, 1973, s. 472-481.
- [96] Muckstadt J. A., Isaac M. H., *An analysis of single item inventory systems with returns*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 28, 1981, s. 237-254.
- [97] Murayama T., Shu L. H., *Treatment of Reliability for Reuse and Remanufacture*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 287-292.
- [98] Murayama T., Yamamoto S., Oba F., *Mathematical Model of Reusability*, Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE), Scottsdale AZ, USA, 2004, s. 183-188.
- [99] Murayama T., Yoda M., Eguchi T., Oba F., *Adaptive Production Planning by Information Sharing for Reverse supply Chain*, Proceedings of the 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'05), Tokyo, Japan, 2005, s. 326-331.
- [100] Murayama T., Yoda M., Eguchi T., Oba F., *Production Planning and Simulation for Reverse Supply Chain*, Japan Society Mechanical Engineering International Journal, Series C, Vol. 49, No. 2, 2006, s. 281-286.
- [101] Murthy D. N. P., Solem O., Roren T., *Product warranty logistics: Issues and challenges*, European Journal of Operational Research, Vol. 156, 2004, s. 110-126.

- [102] Nahmias S., and Rivera H., *A deterministic model for a repairable item inventory system with a finite repair rate*, International Journal of Production Research, Vol. 17, 1979, s. 215-221.
- [103] Nowakowski T., Plewa M., *Kanibalizm - metoda utrzymania systemu technicznego*, Materiały konferencji: Niezawodność systemów antropotechnicznych, XXXVII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 2009, Wyd. Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2009, s. 230-238.
- [104] Okumura S., Morikuni T., Okino N., *Life Design for Remanufacturing Durable Products*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 275-280.
- [105] Omar M., Yeo I., *A model for a production-repair system dunder a time-varying demand process*, International Journal of Production Economics, vol. 119, 2009, s. 17-23.
- [106] Ormon S. W., Cassady C. R., *Cannibalization Policies for a Set of Parallel Machines*, RAMS 2004, s. 540-545.
- [107] Ouyang H., Zhu X., *An Inventory Control System for Remanufacture with Disposal*, RAM, 2006, s. 1-5.
- [108] Pierskalla W. P., Voelker J. A., *A survey of maintenance models: The control and surveillance of deteriorating system*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 23, No. 3, 2006, s. 353-388.
- [109] Plewa M., *Analiza modeli EOQ w systemach logistyki zwrotów*, Logistyka i Transport, Nr 1(8), 2009, s. 131-148.
- [110] Plewa M., *Analiza stochastycznych modeli utrzymania zapasów w systemach opartych na przeglądzie ciągłym*, Logistyka i Transport, Nr 1, 2010 (w druku).
- [111] Plewa M., *Analiza stochastycznych modeli utrzymania zapasów w systemach opartych na przeglądzie okresowym*, Logistyka i Transport, Nr 1, 2010 (w druku).
- [112] Plewa M., *Assessment of Influence of Products' Reliability on Remanufacturing Processes*, International Journal of Performability Engineering, Vol. 5, No. 5, October 2009, s. 463-470.
- [113] Pyke D.F., *Periodic Review Inventory Policies for Remanufacturing*, Tuck School of Business Working Paper No. 1-6, 2001.
- [114] Pyke D. F., *Priority Repair and Dispatch Policies for Repairable-Item Logistics Systems*, Naval Research Logistics, Vol. 37, 1990, s. 1-30.

- [115] Richter K., *An EOQ repair and waste disposal model*, Proceedings of the Eight International Working Seminar on Production Economics, Ings/Innsbruck, Vol. 3, 1994, s. 83-91
- [116] Richter K., Dobos I., *Analysis of the EOQ repair and waste disposal model with integer setup numbers*, International Journal of Production Economics, Vol. 59, 1999, s. 463–467.
- [117] Richter K., *Pure and mixed strategies for the EOQ repair and waste disposal problem*, OR Spectrum, Vol. 19, 1997, s. 123–129.
- [118] Richter K., Sombrutzki M., *Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models*, European Journal of Operational Research, Vol. 121, No. 2, 2000, s. 304-315.
- [119] Richter K., *The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers*, European Journal of Operational Research, Vol. 95, 1996a, s. 313–324.
- [120] Richter K., *The extended EOQ repair and waste disposal model*, International Journal of Production Economics, Vol. 45, 1996b, s. 443–447.
- [121] Richter K., Weber J., *The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost*, International Journal of Production Economics, Vol. 71, 2001, s. 447-456.
- [122] Rogers D. S., Tibben-Lembke R. S., *Going backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reverse Logistics Executive Council, Pittsburgh, PA, 1999.
- [123] Rubio S., Corominas A., *Optimal manufacturing-remanufacturing policies In a a lean production environment*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 55, 2008, s. 234-242.
- [124] Sadowski A., *Zrównoważony rozwój z perspektywy logistyki zwrotnej*, Problemy Ekorozwoju, Vol. 3, No. 2, 2008, s. 129-132.
- [125] Schrady D. A., *A deterministic inventory model for repairable items*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 14, No.3, 1967, s. 391-398.
- [126] Seitz M. A., *A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing*, Journal of Cleaner Production, Vol. 15, 2007, s. 1147-1157.
- [127] Sherbrooke C. C., *An Evaluator for the Number of Operationally Ready Aircraft in a Multilevel Supply System*, Operations Research, Vol. 19, 1971, s. 618- 635.
- [128] Sherbrooke C. C., *METRIC: A Multi-echelon Technique for Recoverable Item Control*, Operations Research, Vol. 16, 1968, s. 122-141.
- [129] Sherwood M., Shu L. H., *Modified FMEA using Analysis of Automotive Remanufacturer Waste Streams to Support Design for Remanufacture*, Proceedings of

- 2000 ASME DETC and CIE Design Theory and Methodology Conference, Baltimore MD, USA, DETC2000/DTM-14567, 2000.
- [130] Sherwood M., Shu L. H., submitted by R. G. Fenton, *Supporting Design for Remanufacture through Waste-Stream Analysis of Automotive Remanufacturers*, CIRP Annals, Vol. 49, No. 1, 2000.
- [131] Shu L. H., Flowers W. C., *Application of design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 15, 1999, s. 179-190.
- [132] Shu L. H., *Reliability modeling in design for remanufacture*, Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering conference, Irvine California, USA, 96DETC/DAC-1487, 1996.
- [133] Shu L. H., Wallace D. R., *Probabilistic Methods in Life-Cycle Design*, Proceeding of the 1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Dallas TX, 1996, s. 7-12.
- [134] Simon R. M., *The Reliability of Multi-component System Subject to Cannibalization*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 19, 1972, s. 1-14.
- [135] Simpson V. P., *Optimum solution structure for a repairable inventory problem*, Operations Research, Vol. 26, No. 2, 1978, s. 270-281.
- [136] Sleptchenko A., van der Heijden M. C., van Harten A., *Effects of finite repair capacity in multi-echelon, multi-indenture service part supply system*, International Journal of Production Economics, Vol. 79, 2002, s. 209-230.
- [137] Sobczyk M., *Statystyka*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
- [138] Soto J. P., Lourenco H. R., *Reverse Logistics Models and Applications: A Recoverable Production Planning Model*, In Proceedings of XXVII Congreso SEIO de Estadística e Investigación Operativa, 2003, s. 2731-2766.
- [139] Spengler Th., Püchert H., Penkuhn T., Rentz O., *Environmental integrated production and recycling management*, European Journal of Operational Research, Vol. 97, 1997, s. 308-326.
- [140] Stachurski M., *Metody numeryczne w programie MATLAB*, Wyd. MIKOM, Warszawa, 2003.
- [141] Sundin E., Bras B., *Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing*, Journal of Cleaner Production, Vol. 13, 2005, s. 913-925.

- [142] Susumu S., Wada Y., Terui H., Uesugi H., Endoh S., Hoshino S., Fujiwara H., Okazaki T., Haruki K., Itoi Y., Inoko M., Mitsuishi G., *Study of Inverse Supply Chain (3), Study of Promotion Issues on inverse supply chain*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), 2001, s. 533-535.
- [143] Szołtysek J., *Logistyka zwrotna, Reverse Logistics*, Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań, 2009.
- [144] Teunter R. H., *Economic ordering quantities for recoverable item inventory system*, Naval Research Logistics, Vol. 48, 2001, s. 484–495.
- [145] Teunter R. H., *Economic order quantities for stochastic discounted cost inventory system with remanufacturing*, International Journal of Logistics: Research and Applications, Vol. 5, No. 2, 2002, s. 161-175.
- [146] Teunter R. H., Flapper S. D. P. *Lot-sizing for a single-stage single-product production system with rework of perishable production defectives*. OR Spectrum, Vol. 25, 2003, s. 85–96.
- [147] Teunter R. H., *Lot-sizing for inventory systems with product recovery*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 46, 2004, s. 431–441.
- [148] Teunter R. H., Vlachos D., *On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured*, International Journal of Production Economics, Vol. 75, 2002, s. 257-266.
- [149] Thierry M. C., Salomon M., Van Nunen J., Van Wassenhove L., *Strategic Issues in Product Recovery Management*, California Management Review, Vol. 37, No. 2, 1995, s. 114–135.
- [150] Toktay L. B., Wein L. W., Zenios S. A., *Inventory Management of Remanufacturable Products*, Management Science, Vol. 46, No. 11, 2000, s. 1412-1426.
- [151] Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. Nr 62, poz. 628).
- [152] Ustawa o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji z dnia 20 stycznia 2005 r. (Dz. U. Nr 25, poz. 202).
- [153] Ustawa o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym z dnia 29 lipca 2005 r. (Dz. U. Nr 180, poz. 1495).
- [154] Valdez-Flores C., Feldman R. M., *A survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit System*, Naval Research, Vol. 66, 1989, s. 419-446.

- [155] Van der Laan E. A., Dekker R., Salomon M., *Product remanufacturing and disposal: A numerical comparison of alternative control strategies*, International Journal of Production Economics, Vol. 45, 1996, s. 489-498.
- [156] Van der Laan E. A., Dekker R., Salomon M., Ridder A., *An (S,Q) inventory model with remanufacturing and disposal*, International Journal of Production Economics, Vol. 46-47, 1996, s. 339-350.
- [157] Van der Laan E. A., Salomon M., *Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal*, International Journal of Operational Research, Vol. 102, 1997, s. 264-278.
- [158] Van Eijl C. A., van Hoesel C. P. M., *On the discrete lot-sizing and scheduling problem with Wagner-Whitin costs*, Operations Research Letters, Vol. 20, 1997, s. 7-13.
- [159] Vlachos D., Dekker R., *Return handling options and order quantities for single period products*, European Journal of Operational Research, Vol. 151, 2003, s. 38-52.
- [160] Wang H., *A survey of maintenance policies of deteriorating system*, European Journal of Operational Research, Vol. 139, 2002, s. 469-489.
- [161] Wang Y., Cohen M. A., Zheng Y., *A Two-Echelon Repairable Inventory System with Stocking-Center-Dependent Depot Replenishment Lead Times*, Management Science, Vol. 46, No. 11, 2000, s. 1441-1453.
- [162] Wciślik M., *Wprowadzenie do systemu Matlab*, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2003.
- [163] Werbińska S., *Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu*, Praca doktorska (nie publikowana), Politechnika Wroclawska, 2008.
- [164] Whisler W. D., *A stochastic Inventory model for rented equipment*, Management Science, Vol. 13, No. 9, 1987, s. 640-646.
- [165] Williams, J., Shu, L. H. submitted by R. G. Fenton, *Analysis of Remanufacturer Waste Streams Across Product Sectors*, CIRP Annals, Vol. 50, No. 1, 2001, s.101-104.
- [166] Williams J., Shu L. H. submitted by R. G. Fenton, *Analysis of Toner-Cartridge Remanufacturer Waste Stream*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco CA, USA, 2000, s. 260-265.
- [167] www.eur-lex.europa.eu
- [168] www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG
- [169] www.mathworks.com
- [170] www.reverselogisticstrends.com
- [171] www.rlmagazine.com

- [172] Yamagiwa Y., Iwata S., Numata J., Namiki Y., *Design Process To Achieve Easy Assembly And Disassembly*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01), Tokyo, Japan, 2001, s. 1102-1105.
- [173] Zijm W. H., Avsar Z. M., *Capacitated two-indenture models for repairable item systems*, International Journal of Production Economics, Vol. 81-82, 2003, s. 573-588.
- [174] Zikopoulos C., Tagaras G., *Impact of uncertainty in the quality of returns on the profitability of a single-period refurbishing operation*, European Journal of Operational Research, Vol. 182, 2007, s. 205-225.