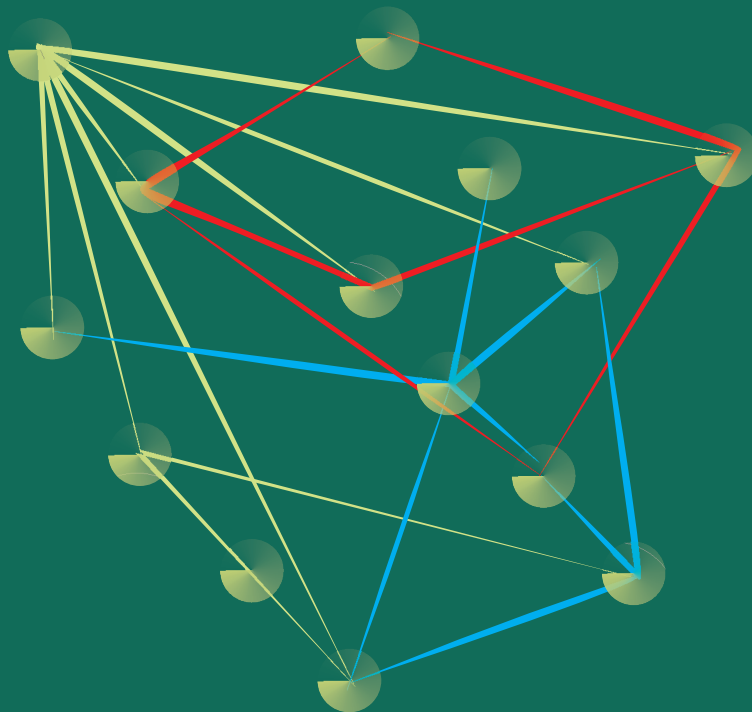


POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

Magdalena Scherer

**Systemy neuronowo-rozmyte  
w zarządzaniu logistyką zwrotną  
w przedsiębiorstwie produkcyjnym**



CZĘSTOCHOWA 2023

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

Magdalena Scherer

**SYSTEMY NEURONOWO-ROZMYTE  
W ZARZĄDZANIU LOGISTYKĄ ZWROTNA  
W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM**

Monografia



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

Częstochowa 2023

**Recenzent**

dr hab. Stanisław Iwan, prof. PM

**Redakcja**

Anita Ganoun

**Redakcja techniczna**

Robert Świerczewski

**Projekt okładki**

Dorota Boratyńska

e-ISBN 978-83-7193-930-3

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej  
Częstochowa 2023

© Copyright by Magdalena Scherer  
Częstochowa 2023



Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa –  
Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowa (CC BY-NC 4.0)  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	<b>5</b>
<b>Rozdział 1. Koncepcja logistyki zwrotnej w zarządzaniu przedsiębiorstwem produkcyjnym</b> .....	<b>8</b>
1.1. Znaczenie logistyki zwrotnej w zarządzaniu przedsiębiorstwem .....	8
1.2. Logistyka tradycyjna a logistyka zwrotna .....	13
1.3. Cele, zadania i obszary zastosowania logistyki zwrotnej .....	18
1.4. Integracja systemu gospodarki odpadami i systemu logistyki zwrotnej .....	25
<b>Rozdział 2. System gospodarki odpadami w przedsiębiorstwie produkcyjnym a logistyka zwrotna</b> .....	<b>34</b>
2.1. Regulacje prawne dotyczące gospodarki odpadami .....	34
2.2. Definicja i klasyfikacja odpadów jako obiektów logistyki zwrotnej .....	40
2.3. Projektowanie produktów przyjaznych środowisku .....	46
<b>Rozdział 3. Wybrane metody sztucznej inteligencji w prognozowaniu ..</b>	<b>51</b>
3.1. Systemy rozmyte – podstawowe pojęcia .....	51
3.2. Wprowadzenie do sztucznych sieci neuronowych .....	54
3.3. Charakterystyka sieci neuronowo-rozmytych .....	59
<b>Rozdział 4. Prognozowanie wielkości strumieni odpadowych w przedsiębiorstwie produkcyjnym</b> .....	<b>64</b>
4.1. Proces pozyskiwania i przygotowania danych uczących .....	64
4.2. Uczenie sieci neuronowo-rozmytych .....	72
4.2.1. Systemy rozmyte z dwiema funkcjami na wejście .....	77
4.2.1.1. Przewidywanie zużycia odpadów nr 080111 .....	78
4.2.1.2. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150102 .....	80
4.2.1.3. Przewidywanie zużycia odpadów nr 130110 .....	82
4.2.1.4. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150110 .....	84
4.2.1.5. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150202 .....	86
4.2.1.6. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150203 .....	88
4.2.1.7. Przewidywanie zużycia odpadów nr 160213 .....	90

4.2.2. Systemy rozmyte z trzema funkcjami na wejście .....	92
4.2.2.1. Przewidywanie zużycia odpadów nr 080111 .....	93
4.2.2.2. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150102 .....	95
4.2.2.3. Przewidywanie zużycia odpadów nr 130110 .....	97
4.2.2.4. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150110 .....	99
4.2.2.5. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150202 .....	101
4.2.2.6. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150203 .....	103
4.2.2.7. Przewidywanie zużycia odpadów nr 160213 .....	105
<b>Zakończenie .....</b>	<b>108</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>111</b>
<b>Spis rysunków .....</b>	<b>119</b>
<b>Spis tabel .....</b>	<b>123</b>

## Wstęp

Rozwój cywilizacji, dynamiczny wzrost zaludnienia naszej planety i związana z tym konieczność zaspokajania coraz to większych potrzeb ludzkości powodują, że wręcz lawinowo rośnie ilość pozostałości poprodukcyjnych i pokonsumpcyjnych. Nieodłączną cechą pozyskiwania i przerobu naturalnych zasobów ziemi są odpady, które powstają najczęściej w wyniku działalności gospodarczej człowieka jako substancje nieprzydatne, a wręcz szkodliwe dla środowiska. W 2021 roku w Polsce wygenerowano 121 mln ton odpadów. Największą grupę odpadów stanowiły odpady przemysłowe, których wytworzono łącznie 107 712 tys. ton (z wyłączeniem odpadów komunalnych)<sup>1</sup>. Najczęściej główną przyczyną wytwarzania nadmiernej ilości odpadów przemysłowych jest nieracjonalne gospodarowanie nieodnawialnymi zasobami naturalnymi.

Powstawania odpadów nie da się uniknąć. Produktywność współczesnej gospodarki generuje ich coraz więcej, co z kolei powoduje coraz większe zagrożenie dla środowiska naturalnego. Niestety w większości przedsiębiorstw nadal nie poświęca się gospodarce odpadami wystarczająco dużo uwagi. Odpady stanowią problem ogólnonarodowy nie tylko krajów wysoko rozwiniętych gospodarczo i przemysłowo, ale także tych zaliczanych do Trzeciego Świata. Polska ciągle jeszcze zajmuje czołowe miejsce w Europie, jeśli chodzi o ilość wytwarzanych odpadów, a przyczyną tego stanu rzeczy jest niski stopień gospodarczego wykorzystania surowców naturalnych, stosowanie przestarzałych metod produkcji, a także brak skutecznych narzędzi umożliwiających gospodarczy odzysk przetwarzanych zasobów. Coraz częściej wzrost świadomości konsumentów oraz regulacje prawne wymuszają na producentach dbałość o ochronę środowiska naturalnego. Choć generowania odpadów nie da się zupełnie wyeliminować, pojawiają się coraz nowsze rozwiązania, które minimalizują ich skutki. Z pomocą przychodzi tutaj logistyka zwrotna. Jej głównym celem jest ponowne wprowadzenie do systemu gospodarczego odpadów, które po odpowiednim przetworzeniu mogą stać się surowcami lub półproduktami.

Funkcje logistyki zwrotnej są stosunkowo rzadko implementowane w systemach informatycznych. Aby efektywnie zarządzać strumieniami odpadów w przedsiębiorstwie, należy je odpowiednio kontrolować. Jednym ze sposobów kontroli gospodarki odpadami w ramach logistyki zwrotnej jest monitorowanie przepływów materiałów. Pozwala to na wykrycie różnego rodzaju nieprawidłowości

---

<sup>1</sup> Główny Urząd Statystyczny, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2022,1,23.html> [dostęp: 23.04.2023].

w tworzeniu i gromadzeniu odpadów. Z powodu braku rozwiązań informatycznych w obszarze logistyki zwrotnej monitorowanie, a co za tym idzie zarządzanie strumieniami odpadów, jest bardzo trudne.

W niniejszej monografii podjęto próbę stworzenia rozwiązań informatycznych wspomagających logistykę zwrotną. Obiektami logistyki zwrotnej są trzy rodzaje pozostałości: produkcyjne, dystrybucyjne oraz konsumenckie. Uwagę poświęcono pierwszej grupie, którą stanowią odpady produkcyjne. Na przykładzie danych pochodzących z produkcji jednego z przedsiębiorstw przeprowadzono badania dotyczące ich przyszłych wielkości. Do prognozy wielkości strumieni odpadowych wykorzystano systemy neuronowo-rozmyte. Zbiorami uczącymi były wielkości strumieni odpadowych w badanym przedsiębiorstwie. Systemy neuronowo-rozmyte zostały poddane uczeniu z danych tak, aby otrzymać jak najmniejszy błąd uczenia.

Realizacji wyznaczonych celów badawczych podporządkowano układ monografii, która składa się z czterech rozdziałów, wstępu i zakończenia. Rozdziały pierwszy, drugi i trzeci tworzą część teoretyczną monografii. Natomiast rozdział czwarty obejmuje opracowanie i wnioski z części empirycznej.

W rozdziale pierwszym opisano znaczenie logistyki zwrotnej. Określono cele, zadania i obszary jej stosowania. Podjęto w nim również próbę uporządkowania definicji logistyki zwrotnej na podstawie istniejącej literatury. Przedstawiono ewolucję koncepcji logistyki zwrotnej zarówno w literaturze obcojęzycznej, jak i polskiej. Porównano logistykę zwrotną z logistyką tradycyjną. Zwrócono uwagę, że system gospodarki odpadami stanowi część systemu logistycznego.

W rozdziale drugim skoncentrowano się na regulacjach prawnych dotyczących gospodarki odpadami. Odwołano się do definicji i klasyfikacji odpadów. Dokonano analizy wielkości odpadów wytwarzanych w Polsce w latach 2000-2021. Szczególną uwagę skupiono na odpadach produkcyjnych, które stanowią największe zagrożenie dla środowiska naturalnego. Opisano również proces projektowania produktu tak, by był on przyjazny środowisku naturalnemu.

Rozdział trzeci dotyczy systemów inteligencji obliczeniowej. Przedstawiono w nim podstawowe informacje na temat zbiorów rozmytych. Ukazano problem interpretacji zmiennych lingwistycznych oraz scharakteryzowano sztuczne sieci neuronowe. Następnie przedstawiono połączenie sieci neuronowych i zbiorów rozmytych, czyli systemy neuronowo-rozmyte.

Rozdział czwarty stanowi część empiryczną pracy. Zaprezentowano tutaj proces uczenia systemów neuronowo-rozmytych. Eksperymenty wykonano w środowisku Matlab, wykorzystując dane dotyczące produkcji siedmiu grup odpadów, które wcześniej uznano za najbardziej znaczące w analizowanym przedsiębiorstwie. Uczono systemy przewidywać produkcję poszczególnych grup odpadów

z miesięcznym wyprzedzeniem na podstawie ich produkcji w poprzednich miesiącach. Ze względu na brak korelacji między ilością odpadów wygenerowanych w poszczególnych grupach każda z grup odpadów została poddana osobnej analizie.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie rozważań teoretycznych i empirycznych. Przedstawiono w nim uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej oraz wyniki przeprowadzonych badań i wnioski.



# Rozdział 1

## Koncepcja logistyki zwrotnej w zarządzaniu przedsiębiorstwem produkcyjnym

### 1.1. Znaczenie logistyki zwrotnej w zarządzaniu przedsiębiorstwem

Odpady są produkowane przez przedsiębiorstwa na każdym etapie ich działalności gospodarczej, zarówno w obrębie zaopatrzenia i produkcji, jak i dystrybucji. Jednakże problematyka gospodarowania odpadami nie odgrywa pierwszoplanowej roli w przedsiębiorstwie. Za zdecydowanie ważniejsze uważa się przemieszczanie w górę w łańcuchu dostaw ze względu na wymagania klientów. Możliwość zwrotów, serwis, obrót produktami używanymi i konieczność zagospodarowania produktów wycofanych z użytku powoduje powstanie drugiego rodzaju przepływów – zwrotnych.

Termin „logistyka zwrotna” pojawił się w literaturze stosunkowo niedawno, pod koniec ubiegłego stulecia, i jest terminem bardzo pojemnym, obejmującym wiele aspektów działań logistycznych. Zainteresowanie tą tematyką ściśle wiąże się z oddziaływaniem przepływów materiałów, w tym odpadowych, na środowisko naturalne. Podejmowano zatem próby określenia i zminimalizowania wpływu działań logistycznych na ekosystem. Rozwiązania w tym zakresie występują w literaturze tematu pod pojęciami: „zielona logistyka” (ang. *green logistics*), „ekologia przemysłowa” (ang. *industrial ecology*) czy „zarządzanie odpadami” (ang. *waste management*)<sup>2</sup>. Głównym celem logistyki zwrotnej jest budowa i rozwijanie logistycznych łańcuchów dostaw rozpiętych pomiędzy miejscami powstawania odpadów a miejscami ich utylizacji. W literaturze przedmiotu logistyka zwrotna jest nazywana również logistyką odwrotną, logistyką powtórnego zagospodarowania, zieloną logistyką, logistyką odpadów, logistyką utylizacji, ekologiastyką, logistyką odwróconą, logistyką posprzedażową, logistyką wsteczną, logistyką recykulacji lub logistyką odzysku. Tak duża liczba synonimów związanych z pojęciem „logistyki zwrotnej” wskazuje na to, iż jest to młoda i dynamicznie rozwijająca się dyscyplina naukowa<sup>3</sup>. Najtrafniejsze wydaje się pojęcie „logistyka zwrotna”, gdyż termin ten sugeruje nie tylko zmianę kierunku przepływu, ale również fizyczną postać produktu, który utracił swoje pierwotne funkcje. Zestawienie różnych koncepcji logistyki zwrotnej przedstawiono w tabeli 1.1.

---

<sup>2</sup> A. Sadowski, *Zarys rozwoju logistyki zwrotnej*, „Logistyka” 2009, 5, s. 12.

<sup>3</sup> J. Vogt, W. Pienaar, P. de Wit, *Business Logistics Management. Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford 2002; H. Dyckhoff, R. Lackes, J. Reese, *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, Springer, Berlin 2004.

**Tabela 1.1. Ewolucja koncepcji logistyki zwrotnej w literaturze obcojęzycznej**

Rok	Autor / Autorzy	Znaczenie logistyki zwrotnej
1981	D. Lambert, J. Stock	Logistyka zwrotna jako przeciwieństwo przepływu materiałów w łańcuchach logistycznych, będące niewygodnym procesem przepływu produktów między podmiotami.
1989	P. Murphy, R. Poist	Logistyka zwrotna jako przepływ produktów w łańcuchu dostaw od konsumentów do producentów.
1992	T. Pohlen, M. Farris	Logistyka zwrotna jako przepływ dóbr od konsumenta w kierunku producenta w kanale dystrybucji.
1992	J. Stock	Termin często używany w odniesieniu do roli logistyki w recyklingu, utylizacji odpadów i zarządzania materiałami niebezpiecznymi; szersza perspektywa odnosi się do działań logistycznych dotyczących redukcji źródeł, recyklingu, zastąpienia, ponownego wykorzystania materiałów i utylizacji.
1993	R.J. Kopicki, M.J. Berg, L. Legg, V. Dasappa, C. Maggioni	Wprowadzenie do odwrotnego łańcucha logistycznego przepływu informacji, wspomagającego jego funkcjonowanie.
1997	M. Fleischmann	Logistyka zwrotna jako proces planowania, wdrażania oraz kontroli wydajnego i efektywnego napływu dóbr wtórnych i związanych z nimi informacji w celu odzysku pewnych wartości produktu lub jego odpowiedniego usuwania.
1999	D. Rogers, R. Tibben-Lembke	Logistyka zwrotna jako proces planowania, implementowania i kontrolowania efektywności przepływu surowców, zapasów w toku, dóbr finalnych i związanych z nimi informacji, z punktu wykorzystania do punktu pochodzenia w celu odzyskania wartości lub właściwej utylizacji.
2005	D. Blumberg	Procesy logistyki zwrotnej występują zarówno w zamkniętych cyklach, jak i oddzielnie, i obejmują one pełną koordynację i kontrolę fizycznego odbioru i dostarczania materiałów, części i produktów bezpośrednio do przetworzenia i recyklingu lub innego zadysponowania, jak i powrotu do obszaru stosowania.
2007	S. Verstrepen, F. Cruijssen, M.P. Brito, W. Dullaert	Logistyka zwrotna jako proces planowania, implementowania i kontrolowania zwrotnego przepływów surowców, zapasów, opakowań i gotowych wyrobów z punktu produkcji, dystrybucji lub wykorzystania do punktu odzysku lub właściwego usunięcia.
2021 <sup>4</sup>	(RLSC) The Reverse Logistics & Sustainability Council	Proces planowania, implementowania i kontrolowania przepływu surowców, zapasów w toku, dóbr finalnych oraz powiązanych z tymi strumieniami informacji z miejsca konsumpcji do punktu pochodzenia dobra, w celu odzyskania jego wartości lub przynajmniej części zainwestowanych uprzednio aktywów bądź właściwej utylizacji produktu.
2021 <sup>5</sup>	(CSCMP) Council of Supply Chain Management Professionals	Wyspecjalizowany segment logistyki koncentrujący się na przepływach, zarządzaniu produktami oraz zasobami po akcie sprzedaży i po ich dostawie do konsumenta.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Janczewski, *Problematyka zarządzania logistycznego strumieniami powrotnymi*, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec 2013, s. 79-80; A. Rushton, J. Oxley, P. Croucher, *Handbook of Logistics and Distribution Management*, Kogan Page, London 2000; M. Fleischmann i in., *Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review*, „European Journal of Operational Research” 1997, 103, 1, s. 1-17

<sup>4</sup> The Reverse Logistics & Sustainability Council, <http://www.reverselogistics.com> [dostęp: 25.02.2021].

<sup>5</sup> CSCMP, Supply Chain Management Definitions and Glossary [https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx) [dostęp: 25.02.2021].

Jedną z pierwszych definicji została przedstawiona przez D. Lamberta i J. Stocka w 1981 roku. Autorzy określili logistykę zwrotną jako podążanie w przeciwną stronę niż przepływy materiałów i produktów w tradycyjnej logistyce<sup>6</sup>. Podobne podejście do pojęcia logistyki zwrotnej zostało przyjęte przez P. Murphy'ego i R. Poista, którzy w 1989 roku określili logistykę zwrotną jako ruch dóbr od konsumenta do producenta w kanale dystrybucji<sup>7</sup>. W latach 90. ubiegłego wieku T. Pohlen i M. Farris<sup>8</sup> określili funkcje zwrotnego kanału przepływu, które obejmują: zbieranie (gromadzenie), testowanie, sortowanie, transport i obróbkę<sup>9</sup>. W tym samym czasie J. Stock rozszerzył definicję w sposób umożliwiający jej zastosowanie w zarządzaniu odpadami. Określił logistykę zwrotną jako proces obejmujący nie tylko recykling surowców, lecz także obsługę odpadów w rozsądnych granicach kosztów oraz przepływ towarów od konsumenta do punktu ich wytworzenia<sup>10</sup>. W podobnym kierunku podąża definicja R. Kopicky'ego i współautorów<sup>11</sup>. Rozszerza ona dotychczasowe definicje o przepływ informacji wspomagający funkcjonowanie łańcucha dostaw. Definicja D.S. Rogersa i Tibben-Lembke'go skupia się na odzyskaniu wartości<sup>12</sup>, natomiast D. Blumberga na przetworzeniu i powrocie do obszaru stosowania<sup>13</sup>. Z kolei D.S. Rogers i R.S. Tibben-Lembke podkreślają, iż logistyka zwrotna kładzie nacisk na rozumienie i minimalizowanie wpływu logistyki na środowisko. Zawiera ona aktywności polegające m.in. na określaniu wpływu na środowisko naturalne poszczególnych węzłów transportowych, certyfikacji ISO 1400, zmniejszaniu zużycia energii w działaniach logistycznych i redukowaniu zużycia materiałów<sup>14</sup>. Natomiast S. Verstrepen, F. Cruijssen, M.P. Brito i W. Dullaert akcentują znaczenie właściwego usunięcia odpadów<sup>15</sup>. W publikacjach dotyczących tematu logistyki zwrotnej występują jeszcze dwie definicje słownikowe, które umieszczone są na stronach dwóch organizacji: The Reverse Logistics

---

<sup>6</sup> D.M. Lambert, J.R. Stock, *Strategic Physical Distribution Management*, Irwin, Homewood 1981, s. 19.

<sup>7</sup> P.R. Murphy, R.P. Poist, *Management of Logistical Retromovements: An Empirical Analysis of Literature Suggestions*, „Transportation Research Forum” 1989, 29, 1, s. 177-184.

<sup>8</sup> T.L. Pohlen, M.T. Farris, *Reverse Logistics in Plastic Recycling*, „International Journal of Physical Distribution and Logistics Management” 1992, 22, 7, s. 35-47.

<sup>9</sup> M. Fleischmann i in., *Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review*, „European Journal of Operational Research” 1997, 103, 1, s. 1-17.

<sup>10</sup> J.R. Stock, *Reverse Logistics*, Council of Logistics Management, Oak Brook 1992.

<sup>11</sup> R.J. Kopicky i in., *Reuse and Recycling: Reverse Logistics Opportunities*, Council of Logistics Management, Oak Brook 1993.

<sup>12</sup> D.S. Rogers, S. Tibben-Lembke, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, University of Nevada, Reno 1999.

<sup>13</sup> D.F. Blumberg, *Introduction to Management of Reverse Logistics and Closed Loop Supply Chain Processes*, CRC Press, Boca Raton 2005.

<sup>14</sup> D.S. Rogers, R.S. Tibben-Lembke, *Going Backwards...*, op. cit., s. 2.

<sup>15</sup> S. Verstrepen i in., *An Exploratory Analysis of Reverse logistics in Flanders*, „European Journal of Transport and Infrastructure Research” 2007, 7, 4, s. 301-316.

& Sustainability Council (RLEC)<sup>16</sup> oraz Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)<sup>17</sup>.

Punktem wyjścia do definicji logistyki zwrotnej jest definicja logistyki według Council of Logistics Management, określająca logistykę jako „proces planowania, realizowania i kontrolowania sprawnego i efektywnego ekonomicznie przepływu surowców, materiałów, wyrobów gotowych oraz odpowiedniej informacji z punktu pochodzenia do punktu konsumpcji w celu zaspokojenia wymagań klienta”<sup>18</sup>. Logistyka zwrotna zawiera wszystkie aktywności wspomniane w powyższym działaniu. Różnicą zasadniczą jest to, że wspomniane aktywności przebiegają w odwrotnym kierunku<sup>19</sup>.

J. Szołtysek podkreśla, iż: „Polscy autorzy, definiując logistykę zwrotną, stosują podejście koncepcyjno-funkcjonalne, zgodnie z którym logistykę można rozumieć jako pewną koncepcję zarządzania przepływami dóbr i informacji – w znaczeniu zbioru metod i funkcji planowania, sterowania, organizowania i kontroli, opartych na zintegrowanym i systemowym ujmowaniu tych przepływów”<sup>20</sup>. Przykładem takiego podejścia, jest definicja J. Bendkowskiego i M. Wengierka, określających logistykę zwrotną jako „zastosowanie koncepcji logistyki w odniesieniu do pozostałości, aby w ten sposób spowodować ekonomicznie oraz ekologicznie skuteczny przepływ pozostałości, przy jednoczesnej transformacji przestrzenno-czasowej, łącznie ze zmianą ilości i gatunku”<sup>21</sup>. Według definicji A. Mesjasz-Lech „logistyka zwrotna obejmuje wszystkie procesy ukierunkowane na przepływy materiałów odpadowych i związanych z nimi informacji w systemie, a w szczególności procesy gromadzenia, składowania, transportu, przetwarzania, powtórnego zagospodarowania, ewentualnie bezpiecznego unieszkodliwiania, przy założeniu, że procesy te będą realizowane z uwzględnieniem efektywności ekonomicznej i sprawności ekologicznej, a ich celem będzie tworzenie realnie zamkniętych systemów obiegu materiałów”<sup>22</sup>. Najpełniejszą definicję logistyki zwrotnej przedstawił J. Szołtysek: „logistyka zwrotna to ogół procesów zarządzania przepływami odpadów (w tym produktów uszkodzonych) i informacji (związanych z tymi przepływami), od miejsc ich powstania (pojawienia się) do miejsca ich przeznaczenia w celu odzyskania wartości (poprzez naprawę, recykling lub przetworzenie) lub właściwego ich unieszkodliwiania i długoterminowego składowania w taki

---

<sup>16</sup> The Reverse Logistics & Sustainability Council, <http://www.reverselogistics.com/> [dostęp: 25.02. 2021].

<sup>17</sup> CSCMP, Supply Chain Management..., op. cit.

<sup>18</sup> J.J. Coyle, E.J. Bardi, J.C. Langrey, *Zarządzanie logistyczne*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2002, s. 50.

<sup>19</sup> D.S. Rogers, R.S. Tibben-Lembke, *Going Backwards...*, op. cit., s. 2.

<sup>20</sup> J. Szołtysek, *Logistyka zwrotna. Reverse Logistics*, Biblioteka Logistyka, Poznań 2009, s. 77.

<sup>21</sup> J. Bendkowski, M. Wengierek, *Logistyka odpadów*, t. 1, *Procesy logistyczne w gospodarce odpadami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002, s. 10.

<sup>22</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna i sprawność ekologiczna logistyki zwrotnej*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012, s. 47.

sposób, by przepływy te były efektywne ekonomicznie i minimalizowały negatywny wpływ odpadów na środowisko naturalne człowieka<sup>23</sup>.

Obok logistyki zwrotnej w literaturze przedmiotu funkcjonuje również drugi nurt związany ze środowiskowo zorientowaną koncepcją logistyki – ekologi-styka. Zakres działań ekologii-styki określa K. Michniewska jako dążenie do zminimalizowania negatywnego wpływu logistyki na środowisko naturalne<sup>24</sup>. Natomiast Z. Korzeń podkreśla łączny wpływ techniki i technologii ochrony środowiska, informatyki i zarządzania w ochronie środowiska oraz ekonomii środowiskowej w ekologii-styce. Jednocześnie definiuje on ekologii-stykę jako „zintegrowany system, który skupia się na koncepcji zarządzania recykulacyjnymi przepływami strumieni materiałów odpadowych oraz przepływami sprzężonych z nimi informacji”<sup>25</sup>. Z kolei M. Kruczek określa ekologii-stykę jako dziedzinę logistyki zorientowanej na ekologię i wśród przyczyn jej rozwoju wymienia m.in. konieczność minimalizowania ilości odpadów trafiających na składowiska<sup>26</sup>. Przykładem podejścia podmiotowo-strukturalnego jest definicja podana w *Kompendium wiedzy o logistyce*. E. Gołębska i jej współpracownicy określają działania logistyki w sferze utylizacji odpadów jako skupione „na tworzeniu łańcuchów logistycznych łączących miejsca powstawania odpadów z miejscami ich utylizacji”<sup>27</sup>. W szczególności wskazują na następujące czynności: segregowanie odpadów, ich przemieszczanie i składowanie, przetwarzanie i udostępnienia surowców wtórnych.

Bez względu na termin określający środowiskowo zorientowaną koncepcję logistyki, akcentuje się w niej potrzebę zmniejszenia negatywnego oddziaływania działalności gospodarczej na środowisko naturalne. W literaturze polskojęzycznej najczęściej pojawiającym się terminem jest jednak „logistyka zwrotna”. W większości definicji logistyki zwrotnej podkreśla się ukierunkowanie na klienta ostatecznego i jego potrzeby. Jest to związane z tym, że konsumenci i ich terażniejsze oraz przyszłe potrzeby stanowią podstawowy element marketingowej orientacji przedsiębiorstwa<sup>28</sup>. To rynek określa zasady, którym podporządkowane są przepływy rzeczowo-informacyjne<sup>29</sup>, również te realizowane w ramach logistyki

---

<sup>23</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 8.

<sup>24</sup> K. Michniewska, *Nowe trendy w logistyce: logistyka odzysku, a nie ekologii-styka*, „Logistyka” 2006, 1, s. 29-30.

<sup>25</sup> Z. Korzeń, *Ekologii-styka*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2001, s. 17-18.

<sup>26</sup> M. Kruczek, *Model łańcucha logistyki odwrotnej zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2012, 60, 1871, s. 168.

<sup>27</sup> E. Gołębska, *Kompendium wiedzy o logistyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 308.

<sup>28</sup> H. Kościelniak, *Essence of Capital Supply in a Company*, [w:] H. Kościelniak (red.), *Processes of Capital Supply in Production Enterprises*, Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006, s. 8.

<sup>29</sup> B. Skowron-Grabowska, *Centra logistyczne w łańcuchach dostaw*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2010, s. 13.

zwrotnej. Tym samym ekologiczna świadomość klientów staje się podstawową determinantą wdrażania koncepcji logistyki zwrotnej w przedsiębiorstwach.

## 1.2. Logistyka tradycyjna a logistyka zwrotna

Logistyka zwrotna znacząco różni się od logistyki rozumianej w sposób tradycyjny. Odmienny jest przede wszystkim kierunek przepływu dóbr oraz ich miejsce docelowe. Logistyka zwrotna często jest spychana na drugi plan. Jednak coraz częściej w przedsiębiorstwach zwraca się uwagę na korzyści płynące z jej zastosowania. W obecnej gospodarce procesy zachodzące w logistyce są zdeterminowane przez kilka znaczących trendów. Jednym z nich jest rosnąca wrażliwość na środowisko naturalne. Kryzysy paliwowe lat 70. ubiegłego wieku spowodowały zmianę podejścia do ochrony środowiska, rozwój nowej świadomości społecznej oraz granic rozwoju gospodarki. Okazało się, że oszczędność surowców naturalnych oprócz pozytywnego wpływu na środowisko często powoduje większą efektywność produkcji<sup>30</sup>.

Tradycyjna logistyka (ang. *forward logistics*) polega na dostarczeniu surowców do producentów, a następnie do klientów końcowych. Po dostarczeniu produktu do miejsca przeznaczenia i użytkowania pierwotny proces logistyczny kończy się, a rozpoczynają się procesy powrotne<sup>31</sup>. To powoduje, że odpowiedzialność wytwórców jest przeniesiona nie tylko na sam koniec cyklu życia produktu, ale dotyczy także szeroko rozumianej obsługi zwrotów i ponownego użycia produktu, niekoniecznie w tej samej postaci. Zależności te przedstawia rysunek 1.1.

Zadania logistyki zwrotnej wynikają m.in. z procesów związanych ze zwrotem produktów, ich serwisowaniem oraz obowiązkiem zagospodarowania po wycofaniu z użytku. Obejmują one nie tylko końcowe etapy życia produktu, lecz także dotyczą obsługi zwrotów i ponownego użycia produktu (nie tylko w pierwotnej postaci). Pamiętać należy bowiem, że działania podjęte w ramach logistyki determinują realizację wszystkich procesów związanych z przepływami rzeczowo-informacyjnymi<sup>32</sup>. Oprócz procesów logistyki tradycyjnej (związanych z przepływami surowców, materiałów oraz gotowych produktów na rynek oraz przepływami produktów reklamowanych, uszkodzonych lub nadwyżek towarów) logistyka zwrotna obejmuje także przepływy produktów zużytych i odpadów

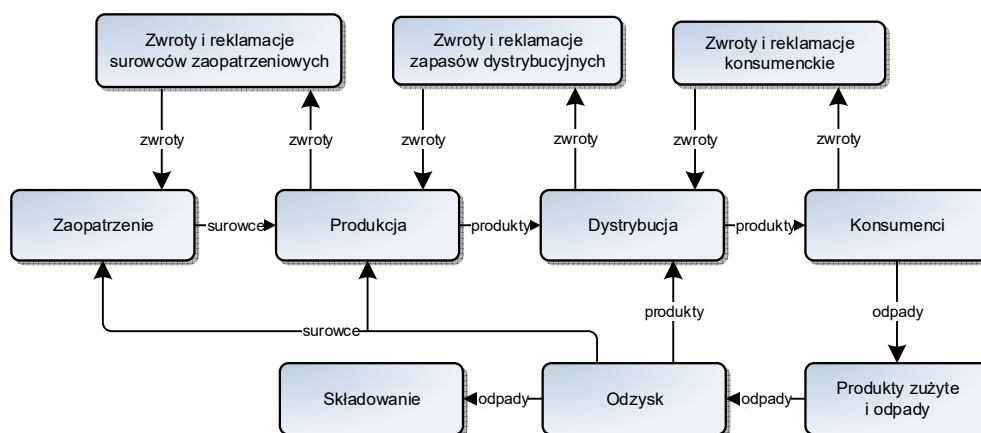
---

<sup>30</sup> P. Badałek-Taracha, B. Ślusarczyk, *Rozwój współczesnej logistyki w świetle nowoczesnych trendów gospodarki*, [w:] W. Skibińska, B. Skowron-Grabowska (red.), *Determinanty zarządzania i rozwoju przedsiębiorstw w Unii Europejskiej*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2007, s. 38-39.

<sup>31</sup> J. Janczewski, *Problematyka zarządzania logistycznym strumieniami powrotnymi*, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec 2013, s. 76-87.

<sup>32</sup> B. Ślusarczyk, *Podstawy kosztów logistyki przedsiębiorstw*, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, s. 7.

oraz produktów częściowo zużytych, będących przedmiotem obrotu na rynku wtórnym, a także odzysk produktów lub surowców.



**Rysunek 1.1. Tradycyjne i odwrotne przepływy surowców, materiałów i produktów**

Źródło: opracowanie własne

W tabeli 1.2 przedstawiono najważniejsze różnice pomiędzy logistyką tradycyjną oraz logistyką zwrotną, oparte na szeregu kryteriów najczęściej wymienianych w publikacjach i opracowaniach dotyczących tematu<sup>33</sup>. Wyróżnione kryteria dotyczą większości elementów składających się na łańcuchach przepływu.

Jedną z różnic pomiędzy logistyką a logistyką zwrotną jest to, że logistyka zwrotna jest bardziej reaktywna jako przepływ zainicjowany przez użytkownika lub końcowego uczestnika kanału dystrybucji<sup>34</sup>. Wśród najważniejszych różnic pomiędzy logistyką zwrotną i tradycyjną należy wymienić zamianę miejsca położenia punktu początkowego i końcowego<sup>35</sup>. O ile przepływ w logistyce tradycyjnej rozpoczyna się w jednym lub kilku punktach i rozprasza się na wiele punktów końcowych, to przepływ zwrotny zaczyna się w wielu punktach i łączy się w kilku lub jednym punkcie końcowym<sup>36</sup>.

<sup>33</sup> D.S. Rogers i in., *Reverse Logistics Challenges*, Council of Logistics Management Annual Conference Proceedings, Oak Brook 2002; R.S. Tibben-Lembke, D.S. Rogers, *Differences between Forward and Reverse Logistics in a Retail Environment*, „Supply Chain Management: An International Journal” 2002, 7, 5, s. 271-282.

<sup>34</sup> J. Grabara, *Logistyka odwrotna nowym wyzwaniem dla systemów informacyjnych*, [w:] *Nowoczesne technologie informacyjne w zarządzaniu*, „Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu” 2003, 986, s. 461-470.

<sup>35</sup> M. Starostka-Patyk, J. Grabara, I. Grabara, *Możliwości wykorzystania technologii RFID w logistyce odwrotnej*, [w:] R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 2, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2011, s. 375-385.

<sup>36</sup> D.S. Rogers, R.S. Tibben-Lembke, *Reverse Logistics Challenge*, University of Nevada, Reno 1999.

**Tabela 1.2. Różnice pomiędzy logistyką a logistyką zwrrotną**

Kryterium	Logistyka (ang. <i>forward logistics</i> )	Logistyka zwrrotna (ang. <i>reverse logistics</i> )
Prognozowanie	Łatwe	Trudne
Dystrybucja	Dystrybucja z jednego punktu do wielu	Dystrybucja z wielu punktów do jednego
Jakość	Jakość produktu ujednolicona	Różna jakość produktu
Opakowania	Ujednolicone opakowania	Zniszczenia opakowań
Przeznaczenie/ trasa przepływu	Przeznaczenie oraz trasy określone	Niejasne przeznaczenie i trasy przepływu
Decyzje	Określone	Nieokreślone
Ceny	Ceny ujednolicone	Ceny zależne od wielu czynników
Szybkość procesów	Szybkość procesów logistycznych ma decydujące znaczenie	Szybkość procesów przepływu nie ma aż tak dużego znaczenia
Koszty dystrybucji	Określone koszty dystrybucji	Koszty dystrybucji trudniejsze do oszacowania
Transport	Transport w kierunku od jednego (kilku) źródeł do wielu lokalizacji końcowych	Transport odwrotny – z wielu miejsc do jednego (kilku) miejsc składowania
Prędkość przemieszczania się towarów/surowców	Duże znaczenie czasu w dostarczeniu towarów odbiorcom	Niewielkie znaczenie czasu trwania procesu dostarczania zwrotów
Zarządzanie magazynami	Przewidywalne	Utrudnione
Łańcuch przepływu	Obejmuje jedynie pełnowartościowe produkty	Obejmuje nie tylko zużyte produkty lecz również przepływ części serwisowych
Cykl życia produktu	Sterowalny cykl życia produktu	Niesterowalny cykl życia produktu
Negocjacje	Łatwość negocjacji między partnerami w łańcuchu	Trudność negocjacji z powodu dodatkowych ustaleń
Przejrzystość procesów	Duża przejrzystość procesów	Mała przejrzystość procesów
Liczebność	Duże ilości standardowych przedmiotów	Zmienne ilości standardowych i niestandardowych przedmiotów
Systemy informacyjne do śledzenia informacji o przepływie	Automatyczne systemy do śledzenia przepływu przedmiotów	Połączenie automatycznych i ręcznych systemów do śledzenia informacji o przepływie
Czas trwania zamówienia	Krótki czas realizacji zamówienia	Średni do długiego czas realizacji zamówienia
Wartość produktu	Wysoka wartość produktu	Średnia do niskiej wartość produktu
Kontrola zapasów	Zlokalizowana w jednym określonym miejscu	Utrudniona, brak centralnego miejsca składowania
Priorytet	Wysoki	Niski
Przepływ produktów	Jednokierunkowy ( <i>pull</i> )	Dwukierunkowy ( <i>push and pull</i> )
Kanał przepływu	Mniej złożony (ang. <i>single or multi-echelon</i> )	Bardziej złożony i zróżnicowany (ang. <i>multi-echelon</i> )
Systemy informacyjne do śledzenia przepływu (ang. <i>information tracking</i> )	Automatyczne systemy informacyjne stosowane do śledzenia przepływu towarów	Połączenie automatycznych i ręcznych systemów informacyjnych stosowanych do śledzenia przepływu

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Janczewski, *Problematyka zarządzania logistycznego...*, op. cit., s. 83; D.S. Rogers i in., *Reverse Logistics Challenges*, Council of Logistics Management Annual Conference Proceedings, Oak Brook 2002; H. Shear, T.W. Speh, J.R. Stock, *The Warehousing Link of Reverse Logistics*, 26<sup>th</sup> Annual Warehousing Education and Research Council Conference, San Francisco 2003; R.S. Tibben-Lembke, D.S. Rogers, *Differences between Forward and Reverse Logistics in a Retail Environment*, „Supply Chain Management: An International Journal” 2002, 7, 5, s. 271-282



Kryteria rozgraniczające logistykę od logistyki zwrotnej to nie tylko kierunek przepływu obiektów, ale też same obiekty. Na wyjściu z systemu, jakim jest przedsiębiorstwo (w obszarze produkcji, dystrybucji i konsumpcji), pojawiają się zarówno wyroby celowe, jak i pozostałości. Wyroby celowe stanowią przedmiot logistyki zaopatrzenia, natomiast pozostałości – logistyki zwrotnej. W zależności od możliwości ponownego użycia pozostałości dzielimy je na surowce wtórne oraz odpady. Natomiast odpady, biorąc pod uwagę ich stan skupienia, można podzielić na materiały stałe, półpłynne i płynne. Do pozostałości zalicza się także produkty używane i zużyte, zamienne agregaty, zwroty z zabezpieczenia magazynowego, puste opakowania i pojemniki<sup>37</sup>. Logistyka zwrotna odnosi się do takich produktów, jak: zużyte materiały, materiały opakowaniowe, zwroty, odpady produkcyjne i produktowe, zbędne produkty oraz produkty niesprawne<sup>38</sup>. Zatem obiektami zainteresowania logistyki zwrotnej są produkty powracające oraz odpady powstające w dowolnym ogniwie łańcucha dostaw. Produkty i odpady, o których mowa, wracają po odzyskaniu wartości jako elementy wejściowe<sup>39</sup>.

Można wyróżnić kilka grup podmiotów, które biorą udział w procesach związanych z logistyką zwrotną. Są to producenci, pośrednicy i dostawcy, którzy występują w tradycyjnym łańcuchu dostaw, wyspecjalizowani pośrednicy logistyki zwrotnej, którymi są np. recyklerzy, organizacje odzysku i utylizacji odpadów oraz rynki wtórne<sup>40</sup>. Główne podmioty występujące w logistyce tradycyjnej oraz zwrotnej wraz z kierunkami przepływu produktów pomiędzy tymi podmiotami zostały przedstawione na rysunku 1.2.

Celowość działań podejmowanych w ramach systemu logistyki zwrotnej determinowana jest realizacją zadań wszystkich podmiotów realizujących przepływy zwrotne. Wynika to z założenia, że tylko zaspokojenie potrzeb wszystkich interesariuszy może zapewnić użyteczność podejmowanych działań<sup>41</sup>.

Przepływy zwrotne możemy podzielić na trzy grupy: produkcyjne, dystrybucyjne oraz konsumenckie. Do pierwszej grupy przynależą produkty lub półprodukty, które nie spełniają norm jakościowych, nadmiar surowców wykorzystywanych w produkcji, a także pozostałości produkcyjne i produkty uboczne.

---

<sup>37</sup> H.C. Pfohl, *Systemy logistyczne. Podstawy organizacji i zarządzania*, Biblioteka Logistyka, Poznań 1998, s. 227.

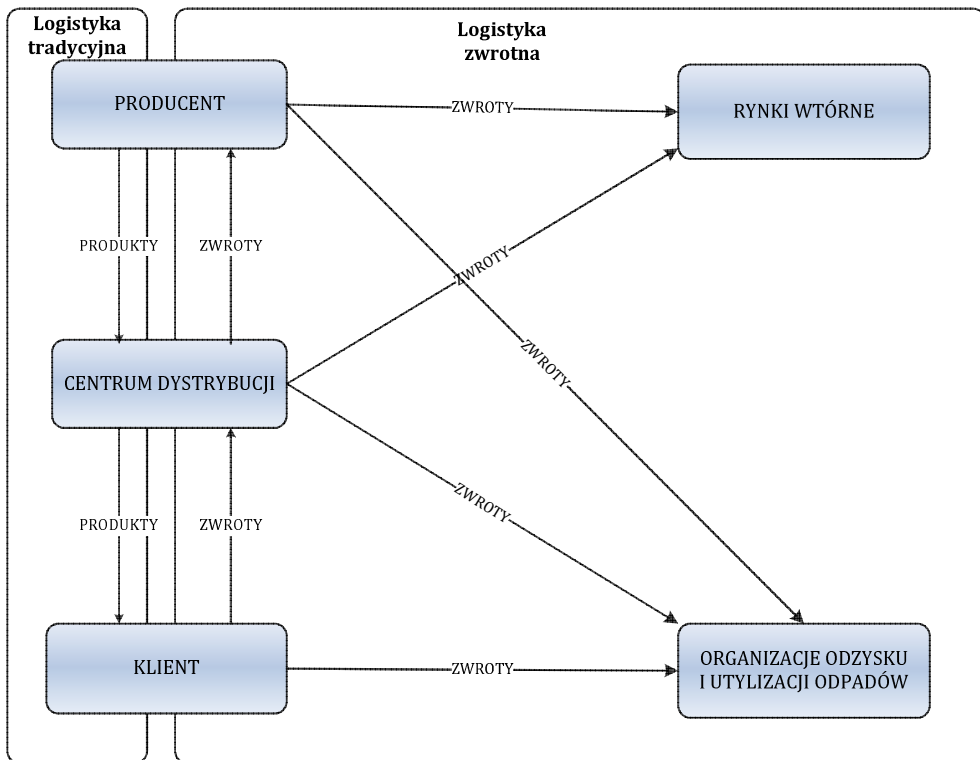
<sup>38</sup> J. Szoltysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 81-82.

<sup>39</sup> S. Kot, *Nowe kierunki rozwoju logistyki*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, s. 65.

<sup>40</sup> A.M. Jeszka, *Logistyka zwrotna, Potencjał, efektywność, oszczędności*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań 2014, s. 43.

<sup>41</sup> S. Iwan, *Zarządzanie miejskim transportem towarowym w kontekście budowania konsensusu pomiędzy zróżnicowanymi oczekiwaniami jego interesariuszy*, [w:] J. Witkowski, A. Skowrońska (red.), *Ekonomiczne, społeczne i środowiskowe uwarunkowania logistyki*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 2015, 383, s. 41.

Kolejną grupę stanowią produkty wycofane, przeterminowane, sezonowe oraz niezgodne z zamówieniem. Znajdują się tutaj również zwroty opakowań zarówno jednostkowych, zbiorczych, jak i transportowych. Zwroty konsumenckie odnoszą się natomiast do produktów zwracanych przez klientów końcowych, do których zaliczamy między innymi zwroty produktów, które nie spełniły oczekiwań nabywców, czy też zwroty z tytułu gwarancji i rękojmi<sup>42</sup>.



**Rysunek 1.2. Przepływy w łańcuchu dostaw w logistyce tradycyjnej i zwrotnej**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A.M. Jeszka, *Logistyka zwrotna. Potencjał, efektywność, oszczędności*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań 2014, s. 44

W niniejszej pracy badawczej skoncentrowano się na pierwszej grupie – zwrotów w produkcji. Odpady powstałe w wyniku działalności produkcyjnej zostały wybrane ze względu na skalę występowania i stopień zagrożenia dla środowiska naturalnego.

<sup>42</sup> A.M. Jeszka, *Logistyka zwrotna...*, op. cit., s. 51.

### 1.3. Cele, zadania i obszary zastosowania logistyki zwrotnej

Cele i zadania logistyki zwrotnej ukierunkowane są na odpady, które po odpowiednim przetworzeniu mogą powrócić do systemu logistycznego jako pełnowartościowe produkty lub surowce wtórne. Głównym celem jest ograniczenie powstawania odpadów, w szczególności tych, które trafiają na wysypiska. Coraz częściej zwraca się uwagę na ograniczone możliwości środowiska naturalnego. Logistyka zwrotna stała się jednym z elementów zasad zrównoważonego rozwoju.

W gospodarce rynkowej podmioty kierują się zazwyczaj własnym interesem oraz maksymalizacją zysku. Głównym celem logistyki zwrotnej jest osiągnięcie równowagi między efektami ekonomicznymi, ekologicznymi oraz społecznymi<sup>43</sup>. Należy dążyć do maksymalizacji ilości surowców wtórnych w produkcji i konsumpcji, co spowoduje zmniejszenie ilości zużywanych surowców pierwotnych. Poza tym trzeba uwzględnić minimalizację kosztów związanych z pozyskiwaniem surowców wtórnych i ponownym wprowadzeniem ich do systemu gospodarczego. Niekiedy nakład energetyczny i materiałowy jest tak duży, że ponowne użycie produktu lub jego części staje się nieopłacalne. Przy optymalizacji przepływów zwrotnych powinno się brać pod uwagę zarówno skuteczność podjętych działań zmierzających do ochrony środowiska, jak i ich efektywność<sup>44</sup>. Zakładając, że skuteczność działań podejmowanych w ramach logistyki zwrotnej wyraża się w dążeniu do redukcji negatywnego oddziaływania na środowisko, cele zarządzania logistycznego powinny koncentrować się zarówno wokół wyników ekonomicznych, jak i ekologicznych.

Cele logistyki zwrotnej można podzielić na trzy kategorie: ekonomiczne, środowiskowe oraz społeczne<sup>45</sup>. Cele te uzupełniają się wzajemnie i wskazują na kompleksowy charakter logistyki zwrotnej. Z ekonomicznego punktu widzenia największą uwagę należy zwrócić na obniżenie kosztów logistyki oraz ogólną poprawę obsługi klienta. Natomiast podejście ekologiczne skupia się na zależności między logistyką a środowiskiem naturalnym. Priorytetem jest tutaj ochrona zasobów naturalnych oraz redukcja zanieczyszczeń<sup>46</sup>. Cele społeczne zorientowane są na zapewnienie wysokiej jakości życia społeczeństw oraz przyszłych pokoleń, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju<sup>47</sup>.

---

<sup>43</sup> P. Klaus, *Logistics as a Science of Networks and Flows*, „Logistics Research” 2010, 2, s. 55.

<sup>44</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna...*, op. cit., s. 49.

<sup>45</sup> K. Witkowski, *Aspekty logistyki odzysku i recyklingu tworzyw sztucznych*, „Logistyka” 2015, 2 [CD1], s. 797.

<sup>46</sup> M. Kuczyńska-Chałada, *Logistyka powtórnego zagospodarowania odpadów i możliwości jej zastosowania w przedsiębiorstwach hutniczych*, [w:] R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2015, s. 891-892.

<sup>47</sup> K. Witkowski, *Aspekty logistyki odzysku...*, op. cit., s. 797.

Centrum zainteresowań logistyki zwrotnej stanowi możliwość przywrócenia pozostałości w jak największym stopniu do stanu pierwotnego i zwrócenia do systemu gospodarczego. Wynika z tego zwiększenie użycia surowców wtórnych w systemie produkcji, co ogranicza zużycie surowców pierwotnych. Oczywiście powinna temu towarzyszyć redukcja kosztów przetwarzania surowców wtórnych, aby zysk dla środowiska był zrównoważony z efektywnością gospodarczą<sup>48</sup>. Logistyka zwrotna obejmuje aktywności związane z gromadzeniem, odzyskiem, ponownym wprowadzeniem do obrotu lub składowaniem produktów wycofanych z użycia. Przepływ materiałów i produktów może występować w dwóch kierunkach: od klienta do producenta (przepływ odwrotny) oraz od producenta do klienta (przepływ tradycyjny). Ponieważ większość produktów i materiałów może być wykorzystana ponownie, zasadniczo przepływ w obu kierunkach tworzy zamkniętą pętlę systemu logistycznego<sup>49</sup>.

Badania nad planowaniem działań w zakresie logistyki zwrotnej trwają już od końca lat 90.<sup>50</sup> i przechodzą intensywny rozwój<sup>51</sup>. Nierozzerwalnym elementem logistyki zwrotnej są rozliczne czynności, których przykłady to: naprawa i powtórne użycie (ponowne włączenie do systemu produktu w niezmienionej formie, dlatego jego jakość może być niższa niż była pierwotnie), renowacja (przywracanie produktom odpowiedniej jakości poprzez demontaż i wymianę uszkodzonych części czy modernizację, gdzie przestarzałe moduły zastępuje się nowocześniejszymi), regeneracja (demontaż, naprawa i wymiana poszczególnych części, tak by produkt spełniał odpowiednie wymogi jakościowe), kanibalizacja (odzysk niedużej części modułów ze zużytego produktu i poddanie ich naprawie, renowacji czy regeneracji) oraz recykling (odzysk materiałów i surowców wtórnych ze zużytych produktów)<sup>52</sup>. Całokształt zagadnień związanych z wymienionymi czynnościami i ukierunkowanych na wyznaczanie celów oraz sposobów ich osiągnięcia stanowi podstawę zarządzania logistyką zwrotną. Zarządzanie logistyką zwrotną odnosi się również do czynności związanych ze zwrotami towarów. Mowa tutaj o monitorowaniu przepływów zwrotnych, skracaniu czasu gospodarowania zwrotami, gromadzeniu i przetwarzaniu informacji

---

<sup>48</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna...*, op. cit., s. 48-49.

<sup>49</sup> V. Jayaraman, V. Guide, R. Srivastava, *A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing*, „Journal of the Operational Research Society” 1999, 50, s. 497-508.

<sup>50</sup> M. Fleischmann i in., *Quantitative Models for...*, op. cit., s. 1-17; A.I. Barros, R. Dekker, V. Scholten, *A Two-Level Network for Recycling Sand: A Case Study*, „European Journal of Operational Research” 1998, 110, s. 199-214; V. Jayaraman, V. Guide, R. Srivastava, *A Closed-Loop Logistics Model...*, op. cit., s. 497-508.

<sup>51</sup> S.K. Srivastava, *Network Design for Reverse Logistics*, „Omega” 2008, 36, 4, s. 535-548; M.T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama, *Facility Location and Supply Chain Management – A Review*, „European Journal of Operational Research” 2009, 196, s. 401-412.

<sup>52</sup> A. Mesjasz-Lech, *Makroekonomiczne aspekty logistyki zwrotnej*, „Logistyka” 2011, 2, s. 448.

dotyczących zwrotów, centralizacji punktów przyjmowania zwracanych produktów, odpowiednim postępowaniu z odpadami oraz zarządzaniu finansami<sup>53</sup>.

W Ustawie z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach przedstawiono hierarchię odzyskiwania wartości z odpadów, w której jasno określono sposoby postępowania z odpadami. Jako najwyższy priorytet uznano zapobieganie powstawaniu odpadów, następnie przygotowanie do ponownego użycia, recykling oraz inne metody odzysku, w tym odzysk energii i składowanie. Składowane powinny być tylko i wyłącznie odpady, w przypadku których zastosowanie innych metod unieszkodliwienia jest niemożliwe. Hierarchię postępowania z odpadami przedstawia rysunek 1.3. Odpady w pierwszej kolejności powinny zostać poddane przetworzeniu w miejscu ich powstania. Jeśli jest to niemożliwe, należy przekazać je do najbliższego miejsca, w którym mogą być przetworzone. Czynności te za każdym razem powinny być wykonywane przy uwzględnieniu hierarchii postępowania z odpadami<sup>54</sup>.



**Rysunek 1.3. Hierarchia sposobów postępowania z odpadami**

Źródło: opracowanie własne na podstawie Ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21)

Z. Łukasik i J. Bril wskazują na zadania logistyki zwrotnej jako konsekwencje wynikające ze wspomnianej powyżej hierarchii odzyskiwania odpadów. Wiąże się to z tworzeniem wydajnych logistycznie kanałów obrotu opakowaniami zwrótnymi oraz produktami gotowymi wycofanymi na różnych etapach łańcucha handlowego, tworzeniem odpowiednich metod sortowania, gromadzenia i odbioru

<sup>53</sup> M. Starostka-Patyk, T. Nitkiewicz, *Produkty niepełnowartościowe i zarządzanie nimi w koncepcji logistyki odwrotnej*, „Logistyka” 2014, 3, s. 5952.

<sup>54</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).

zużytych surowców i ostatecznie transportu nieprzetworzonych odpadów do składowisk czy miejsc utylizacji<sup>55</sup>. Zadaniem logistyki zwrotnej będzie zatem zachowanie równowagi pomiędzy napływającymi odpadami, odzyskiem surowców i materiałów oraz składowaniem odpadów<sup>56</sup>. Ważnym elementem łańcucha dostaw jest powtórne wykorzystanie odpadów<sup>57</sup>.

Odpady są nieodłącznym elementem logistyki zwrotnej. 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<sup>58</sup>. M. Kruczek wskazuje na to, iż pod pojęciem „odpadu” można rozumieć także surowce, które wymagają przekształcenia przed powtórny wprowadzeniem do obrotu<sup>59</sup>.

A. Merkisz-Guranowska podkreśla, iż w zależności od przyczyn, dla których produkty powracają do sieci logistycznej, można wyróżnić szereg rodzajów przepływów zwrotnych w kontekście odzysku. Pierwszy typ przepływu został określony jako odzysk zwrotów. Dotyczy on najczęściej niesprzedanych produktów oraz produktów, z zakupu których klient zrezygnował. Kanałem zakupu najczęściej jest Internet oraz sprzedaż wysyłkowa. Drugi typ przepływu związany jest z reklamacjami, a dokładniej z odzyskiem zwrotów. Jest to zazwyczaj obsługa wadliwych produktów, wynikająca z gwarancji lub rękojmi. Możemy też wyodrębnić przepływ odzysku odpadów, którego obsługa wynika z wielu czynników, najczęściej jest on wynikiem regulacji prawnych oraz względów ekonomicznych. Względy ekonomiczne są dyktowane opłacalnością odzysku surowców wtórnych. Kolejny rodzaj przepływów związany jest z odzyskiem opakowań. Należy tu wymienić nie tylko kwestie związane z ochroną środowiska, lecz także z odpowiedzialnością producentów. W tym przypadku odpowiedzialność producentów dotyczy nie tylko dostarczenia produktu do klienta, lecz również zagospodarowania wycofanych z użycia produktów. Działania te zapobiegają gwałtownemu wzrastaniu ilości generowanych odpadów oraz umożliwiają uzyskanie korzyści ekonomicznych w postaci cennych surowców wtórnych<sup>60</sup>.

---

<sup>55</sup> J. Bril, Z. Łukasik, *Problematyka odpadów z uwzględnieniem logistycznego systemu gospodarki odpadami*, „Logistyka” 2011, 3.

<sup>56</sup> C.C. Chen, *A Waste Management Model for Optimal Recycling-Landfilling Policies under Macroeconomic Conditions*, „Economic Modelling” 2011, 28, s. 858.

<sup>57</sup> B. Bilitewski, G. Hardtle, K. Marek, *Podręcznik gospodarki odpadami. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2006, s. 716.

<sup>58</sup> A. Sadowski, *Zrównoważony rozwój z perspektywy logistyki zwrotnej. Sustainable Development from Reverse Logistics Perspective*, „Problemy Ekorozwoju – Problems of Sustainable Development” 2008, 3, 2, s. 129-132.

<sup>59</sup> M. Kruczek, *Model łańcucha...*, op. cit., s. 165-178.

<sup>60</sup> A. Merkisz-Guranowska, *Logistyka recyklingu odpadów, jako jeden z elementów Systemu Logistycznego Polski*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport” 2010, 75, s. 91.

H. Brdulak i K. Michniewska zwracają uwagę na korzyści dla przedsiębiorstw wynikające ze stosowania rozwiązań logistyki zwrotnej. Do najważniejszych aspektów należy zaliczyć rekompensatę kosztów związanych z obsługą odpadów poprzez zyski związane z surowcami wtórnymi. Dodatkowo stosowanie rozwiązań logistyki zwrotnej wymusza rozbudowę odpowiedniej infrastruktury, sprzyjającej zwiększeniu ilości odpadów podlegających selektywnej zbiórce. Powoduje to wzrost przewagi konkurencyjnej na rynku usług logistyki zwrotnej<sup>61</sup>. W cytowanej pracy podkreślono fakt, iż to sposób logistycznego organizowania przepływów decyduje o wartości surowców będących przedmiotem tych przepływów. Należy przy tym pamiętać, że celem logistyki zwrotnej jest również zwiększenie ilości surowców wtórnych wykorzystywanych w produkcji i konsumpcji, co prowadzi do ochrony zasobów naturalnych przy zachowaniu ekonomiczności realizowanych procesów<sup>62</sup>. Właściwe postawy będą się utrzymywały, a także zwiększały krąg zaangażowanych wykonawców, niezbędnych do ich prawidłowej realizacji, szczególnie w odniesieniu do segregacji u źródła, a więc po stronie producenta oraz konsumenta<sup>63</sup>.

Ze strategicznego punktu widzenia wiele przedsiębiorstw rozpatruje rozwiązanie logistyki zwrotnej jako potencjalny zysk i sposób uzyskania kompetencyjnej przewagi nad konkurencyjnymi przedsiębiorstwami, co prowadzi do proaktywnych rozwiązań<sup>64</sup>. Początkowo wśród przedsiębiorstw dominowały trzy główne motywacje do stosowania logistyki zwrotnej: czynniki ekonomiczne, legislacyjne i tzw. odpowiedzialność społeczna<sup>65</sup>. Ekonomiczne aspekty powodowały powstawanie aktywności takich jak regeneracja, powtórne wykorzystanie materiałów oraz odnawianie<sup>66</sup>. Każda z tych aktywności generowała zyski dla producentów poprzez minimalizację kosztów, dostęp do nowych grup klientów oraz nowe źródło przychodów<sup>67</sup>. Przykładem wprowadzania takich rozwiązań jest firma Recellular, która znalazła niszę rynkową w regenerowaniu telefonów komórkowych<sup>68</sup>. Jednak nawet bez stałych przychodów z wymienionych

---

<sup>61</sup> H. Brdulak, K. Michniewska, *Logistyka odzysku*, „Logistyka” 2009, 5, s. 16-21.

<sup>62</sup> A. Mesjasz-Lech, *Przesłanki rozwoju ekologicznej koncepcji logistyki przedsiębiorstw w Polsce*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Zarządzanie i Marketing” 2010, 17, 2, s. 287.

<sup>63</sup> G. Lichocik, A. Sadowski, *Koszty logistyki zwrotnej w zarządzaniu łańcuchami dostaw w świetle badań*, „Logistyka” 2013, 2.

<sup>64</sup> E.J. Marien, *Reverse Logistics as Competitive Strategy*, „Supply Chain Management Review” 1998, 2, 1.

<sup>65</sup> M.P. Brito, R. Dekker, S.D.P. Flapper, *Reverse Logistics – A Review of Case Studies*, „Distribution Logistics. Advanced Solutions to Practical Problems” 2005, 4, s. 243-281.

<sup>66</sup> M.J. Álvarez-Gil i in., *Reverse Logistics, Stakeholders' Influence, Organizational Slack, and Managers' Posture*, „Journal of Business Research” 2007, 60, s. 463-473.

<sup>67</sup> J. Stock, T. Speh, H. Shear, *Many Happy (Product) Returns*, „Harvard Bus Review” 2002, 80, 7, s. 16.

<sup>68</sup> V.D. Guide Jr, L.N. Van Wassenhove, *Managing Product Returns for Remanufacturing*, „Production Operating Management” 2001, 10, 2, s. 142-155.

aktywności działalność polegająca na obsłudze towarów już raz wypuszczonych na rynek może być dochodowa<sup>69</sup>.

Temat powtórnej obsługi towarów wypuszczonych przez przedsiębiorstwa na rynek podejmowali w swoich pracach M.P. Brito, R. Dekker i S.D.P. Flapper<sup>70</sup> oraz K. Lieckens i N. Vandaele,<sup>71</sup> którzy zaprezentowali m.in. ramy pojęciowe dla logistyki zwrotnej. W swojej pracy przeprowadzili próbę określenia znaczenia szeregu pojęć związanych z logistyką zwrotną (m.in. powtórne użycie, regeneracja i recykling). Zbadali również obecność rozwiązań wspieranych przez państwo (np. sieci recyklingu), stwierdzając, że ma ono wpływ na obniżenie kosztów działania firm zajmujących się recyklingiem. Wynika to z faktu, iż optymalizacja procesów logistyki zwrotnej zależy w dużym stopniu od lokalizacji infrastruktury. Odpowiednia lokalizacja zapewnia właściwy dopływ zwrotów oraz pozwala na osiągnięcie równowagi pomiędzy wpływającymi i opuszczającymi sieci przedmiotami.

H.K. Chen, H.W. Chou i Y.C. Chiu zwracają uwagę na zastosowanie logistyki zwrotnej w obsłudze klienta, magazynowaniu, prostych naprawach, obsłudze zużytego sprzętu elektronicznego oraz obsłudze telefonicznej poprzez call center<sup>72</sup>. Przy tak szeroko rozumianej logistyce zwrotnej znaczenia nabiera gospodarka odpadami nienadającymi się do powtórnego użycia.

Wzrost znaczenia gospodarki odpadami w przedsiębiorstwie jest efektem zwiększania się świadomości nabywców o szkodliwym wpływie produktów na środowisko naturalne. Wpływ ten obejmuje szereg pojęć i kryteriów np. dostępność czystych technologii i materiałów<sup>73</sup>, środowiskowa współpraca z dostawcami, misja środowiskowa<sup>74</sup>, kontrola zanieczyszczeń i odpadów<sup>75</sup>, zielony wizerunek

---

<sup>69</sup> M.W. Toffel, *Strategic Management of Product Recovery*, „California Management Review” 2004, 46, 2, s. 120-141; H.I. Hsiao, *A Classification of Logistic Outsourcing Levels and Their Impact on Service Performance. Evidence from the Food Processing Industry*, „International Journal Production Economics” 2010, 124, s. 75-86.

<sup>70</sup> M.P. Brito, R. Dekker, S.D.P. Flapper, *Reverse Logistics – A Review of Case Studies*, Erasmus University and the Erasmus School of Economics (ESE), Rotterdam 2003.

<sup>71</sup> K. Lieckens, N. Vandaele, *Reverse Logistics Network Design with Stochastic Lead Times*, „Computers & Operations Research” 2005, 34, s. 1-22.

<sup>72</sup> H.K. Chen, H.W. Chou, Y.C. Chiu, *On the Modeling and Solution Algorithm for the Reverse Logistics Recycling Flow Equilibrium Problem*, „Transportation Research. Part C” 2007, 15, s. 218-234.

<sup>73</sup> G. Noci, *Designing ‘Green’ Vendor Rating Systems for the Assessment of a Supplier’s Environmental Performance*, „European Journal of Purchasing & Supply Management” 1997, 3, 2, s. 103-114.

<sup>74</sup> H. Min, W.P. Galle, *Green Purchasing Strategies: Trends and Implications*, „Journal of Purchasing and Materials” 1997, 33, 3, s. 10-17.

<sup>75</sup> P.K. Humpreys, Y.K. Wong, F.T.S. Chan, *Integrating Environmental Criteria into the Supplier Selection Process*, „Journal of Materials Processing Technology” 2003, 138, 1-3, s. 349-356.



przedsiębiorstwa, zarządzanie procesami zielonej logistyki<sup>76</sup>, koszty cyklu życia netto / koszty środowiskowe<sup>77</sup>, środowiskowe i legislacyjne zarządzanie, opakowania i logistyka zwrotna<sup>78</sup>, rozwiązania i programy środowiskowe<sup>79</sup>.

Wyniki badań oddziaływania produktów na środowisko naturalne są wykorzystywane do kształtowania odpowiedzialnej polityki środowiskowej przedsiębiorstw i prawodawców. Najczęściej jest ona realizowana poprzez informowanie zainteresowanych inwestorów, organizacji ekologicznych oraz konsumentów o polityce środowiskowej podmiotów i wpływie tej polityki na środowisko. Aby przetrwać na konkurencyjnym rynku, przedsiębiorstwa nie mogą ignorować kwestii ochrony środowiska naturalnego<sup>80</sup>. Ważną rolę w procesie budowania proekologicznego wizerunku przedsiębiorstwa odgrywa ekoznakowanie produktów – produkty przyjazne środowisku naturalnemu oznacza się specjalnym znakiem jakościowym. Ekoznakowanie odbywa się na podstawie analizy całego cyklu życia produktu. Do głównych kryteriów branych pod uwagę przy ekoznakowaniu należą: niska uciążliwość dla środowiska naturalnego, niski stopień zawartości substancji szkodliwych, niska emisja zanieczyszczeń, niskie zużycie materiałów i energii podczas produkcji, wykorzystywanie surowców wtórnych, możliwość ponownego wykorzystania produktu czy długi okres jego eksploatacji<sup>81</sup>. Przykładem takich działań są badania wykonane przez organizację Carbon Trust w Wielkiej Brytanii, gdzie znakowano produkty „ślądem węglowym” (ang. *carbon footprint*). Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że konsumenci zwracają coraz większą uwagę na wpływ, jaki mają kupowane przez nich produkty na środowisko naturalne. Chcą również poznać przedsiębiorstwa, które dążą do minimalizacji ilości generowanych zanieczyszczeń oraz dowiedzieć się o sposobach konsumpcji, które byłyby bardziej przyjazne środowisku naturalnemu. Dlatego wprowadzono sposób znakowania produktów wartością emisji CO<sub>2</sub> w Wielkiej Brytanii i Japonii.

---

<sup>76</sup> G. Tuzkaya, *Environmental Performance Evaluation of Suppliers: A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision Approach*, „International Journal of Environmental Science and Technology” 2009, 6, 3, s. 477-490.

<sup>77</sup> D.H. Lee, M. Dong, *Dynamic Network Design for Reverse Logistics Operations under Uncertainty*, „Transportation Research. Part E” 2009, 45, 1, s. 61-71.

<sup>78</sup> S.V. Walton, R.B. Handfield, S.A. Melnyk, *The Green Supply Chain: Integrating Suppliers into Environmental Management Processes*, „Journal of Supply Chain Management” 2006, 34, 2, s. 2-11.

<sup>79</sup> R. Handfield, *Applying Environmental Criteria to Supplier Assessment: A Study in the Application of the Analytical Hierarchy Process*, „European Journal of Operational Research” 2002, 141, 1, s. 70-87.

<sup>80</sup> A.H.I. Lee, *A Green Supplier Selection Model for High-Tech Industry*, „Expert Systems with Applications” 2009, 36, 4, s. 7917-7927.

<sup>81</sup> T. Nitkiewicz, *Ekologiczna ocena cyklu życia produktu w procesach decyzyjnych przedsiębiorstw produkcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013, s. 60-61.

Producenci poszukują skutecznych dróg do zintegrowania logistyki zwrotnej z ich łańcuchami przepływu głównie z powodu wartości ekonomicznej odzyskiwanej nie tylko z surowców ze zwracanych przedmiotów, lecz również jako oszczędności w postaci zmniejszonych kosztów składowania odpadów niepodlegających odzyskowi<sup>82</sup>. Decyzje producenta rozpoczynającego wprowadzanie rozwiązań związanych z logistyką zwrotną powinny dotyczyć m.in. typu obsługi transportu i lokalizacji miejsca składowania zwrotów. W celu usprawnienia planowanego i realizowanego przepływu surowców i materiałów stosuje się podejście analityczne.

Zagadnienia dotyczące generowania odpadów i ich wpływu na środowisko podnoszą kwestie odpowiedzialności przedsiębiorstw. Według W. Chapple, C.J. Morrison Paul i R. Harrisa redukcja ilości odpadów wynikająca zarówno z zewnętrznych regulacji, jak i z polityki środowiskowej przedsiębiorstw jest znaczącą pozycją po stronie kosztów. Niezależnie czy wynika to ze specyfiki procesu produkcyjnego, czy ze stosowanych rozwiązań<sup>83</sup>.

Wzrost świadomości konsumentów oraz producentów dotyczącej ochrony środowiska naturalnego wymusza wprowadzenie odpowiednich działań związanych z logistyką zwrotną. Efektywne zarządzanie strumieniami odpadów i zwrotów wiąże się nie tylko z korzyściami finansowymi, ale również z poprawą wizerunku przedsiębiorstwa.

#### **1.4. Integracja systemu gospodarki odpadami i systemu logistyki zwrotnej**

Nowe podejście do zarządzania traktuje dbałość o środowisko naturalne człowieka jako czynnik promocji przedsiębiorstwa. Coraz częściej w przedsiębiorstwach realizowana jest polityka prośrodowiskowa. Wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa, odpowiednie regulacje prawne, rosnące wymagania klientów w zakresie ekologii, dopasowywanie się do wymogów rynku europejskiego, gdzie nie ma miejsca na produkty niespełniające norm ochrony środowiska, to tylko niektóre czynniki mające wpływ na prośrodowiskowe ukierunkowanie przedsiębiorstw. Dlatego poszukuje się rozwiązań, które umożliwią integrację ochrony środowiska z innymi funkcjami przedsiębiorstwa. Strategia

---

<sup>82</sup> M.J. Realff, J.C. Ammons, D. Newton, *Strategic Design of Reverse Production Systems*, „Computers and Chemical Engineering” 2000, 24, s. 991-996; E. Ley, M.K. Macauley, S.W. Salant, *Spatially and Intertemporally Efficient Waste Management: The Costs of Interstate Trade Restrictions*, „Journal of Environmental Economics and Management” 2002, 43, 2, s. 188-218.

<sup>83</sup> W. Chapple, C.J. Morrison Paul, R. Harris, *Manufacturing and Corporate Environmental Responsibility: Cost Implications of Voluntary Waste Minimization*, „Structural Change and Economic Dynamics” 2005, 16, s. 347-373.

środowiskowa powinna swoim zakresem obejmować całe przedsiębiorstwo oraz być traktowana na równi z innymi strategiami, tj. marketingową, produkcyjną czy finansową.

System logistyczny możemy określić jako „celowo zorganizowany i zintegrowany w obrębie danego układu gospodarczego – przepływ materiałów i produktów oraz odpowiadających im informacji, umożliwiających optymalizację w zarządzaniu łańcuchami dostaw (m.in. poprzez: automatyczną identyfikację towarów, symulację komputerową, kontroling, elektroniczną wymianę danych oraz kompleksowy rachunek kosztów)”<sup>84</sup>. Wszelkie procesy logistyczne realizowane są w obrębie systemów logistycznych. Systemy te rozpościerają się od miejsc pozyskiwania surowców (materiałów, wyrobów) do miejsc dostarczania wyrobów gotowych ostatecznemu nabywcy. System logistyczny przedsiębiorstwa, według E. Gołembskiej, jest zbiorem podsystemów: zaopatrzenia, produkcji, transportu i magazynowania, zbytu oraz relacji pomiędzy podsystemami i ich właściwościami<sup>85</sup>. Funkcjonowanie systemów logistycznych polega na rozwiązywaniu szeregu zadań i realizacji procesów logistycznych<sup>86</sup>. Rosnąca ilość materiałów oraz informacji powoduje automatyczne zwiększenie znaczenia systemów logistycznych. Dzięki sprawnie działającym systemom logistycznym przedsiębiorstwa mogą skutecznie realizować zamierzone cele<sup>87</sup>.

System gospodarki odpadami stanowi część systemu logistycznego. Osiągnięcie zrównoważonego rozwoju gospodarki jest możliwe tylko przy zastosowaniu odpowiednich metod zarządzania zarówno we wszystkich obszarach działalności produkcyjnej, jak i konsumenckiej. Wyzwaniem dla współczesnej logistyki jest stworzenie sprawnie działającego systemu gospodarki odpadami. System ten powinien składać się z podsystemu obsługującego przepływy materiałów odpadowych i podsystemu informacyjno-decyzyjnego<sup>88</sup>.

J. Szołtysek wymienia podstawowe determinanty funkcjonowania logistycznego systemu gospodarki odpadami, którymi są: ilość, charakter oraz przestrzenna lokalizacja odpadów; regularność i dynamika powstawania odpadów; ustalone reguły polityki ochrony środowiska; czynniki przestrzenno-urbanistyczne: struktura i ukształtowanie regionu, możliwości umiejscowienia obiektów systemu, szlaki komunikacyjne, przestrzenna struktura działalności gospodarczej itp.; ogólne standardy oraz miejscowe (lokalne i regionalne) wymagania

---

<sup>84</sup> S. Abt, *Specyfika logistyki ponad granicami*, [w:] S. Abt (red.), *Logistyka ponad granicami*, Biblioteka Logistyka, Poznań 2000, s. 11.

<sup>85</sup> E. Gołembska, M. Szymczak, *Informatyzacja w logistyce przedsiębiorstw*, PWN, Warszawa 1997, s. 9.

<sup>86</sup> S. Abt, H. Woźniak, *Podstawy logistyki*, Uniwersytet Gdański, Gdańsk 1993, s. 24.

<sup>87</sup> M. Nowicka-Skowron, *Efektywność systemów logistycznych*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2000, s. 7.

<sup>88</sup> T. Nowakowski (red.), *Systemy logistyczne*, cz. 2, Difin, Warszawa 2011, s. 23.

dotyczące dopuszczalnych obciążeń elementów środowiska, jak również strategie stosowane przez podmioty łańcuchów dostaw<sup>89</sup>. Większość wymagań z zakresu ochrony środowiska wynika z przepisów prawnych, które nie gwarantują jednak optymalnego gospodarowania odpadami<sup>90</sup>.

Gospodarka odpadami opiera się na zasadzie 3R (ang. *reduce – reuse – recycle*). Zgodnie z tą zasadą działania związane z gospodarką odpadami są zhierarchizowane w ten sposób, aby zminimalizować ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Największy priorytet ma eliminacja niepotrzebnego generowania odpadów. Redukcja (ang. *reduction*) to nic innego jak unikanie, zapobieganie lub minimalizowanie generowanych odpadów. Wdrażane technologie powinny być małodopadowe, a najlepiej bezodpadowe. Najważniejszy jest etap projektowania produktu, gdzie szkodliwość i negatywne oddziaływanie na środowisko jest minimalizowane i ograniczone we wszystkich fazach życia produktu. Jest to zgodne z koncepcją „czystych produkcji”, czyli redukcją odpadów w miejscu ich powstania. Tego typu działania polegają na odpowiednim zarządzaniu, ograniczającym marnotrawstwo zasobów pracy, materiałów i energii<sup>91</sup>. Druga grupa działań (ang. *reuse*) obejmuje szeroko rozumiane powtórne użycie, w tym także odzysk i przetworzenie na energię. Zasada ta odnosi się do powtórnego wykorzystania produktów, materiałów lub energii, tym samym redukuje zużycie surowców naturalnych, ogranicza zanieczyszczenie środowiska naturalnego oraz powstawanie odpadów. Czasami powtórnie bądź też wielokrotnie wykorzystywane dobra znajdują zupełnie inne zastosowanie niż wcześniej. Podstawą wdrażania tej zasady powinno być m.in. stosowanie opakowań wielokrotnego użytku. Jednorazowe torebki można zastąpić torbami tekstylnymi czy też wprowadzić na rynek opakowania zwrotne. Ostatnia grupa działań skupia się wokół recyklingu. Najważniejsze jest tutaj odpowiednie segregowanie odpadów w celu ponownego przetworzenia surowca, z którego zostały wykonane. Dopiero w ostateczności materiały mogą być utylizowane. Dzięki temu można ograniczyć dewastacyjny wpływ gospodarki na środowisko naturalne do niezbędnego minimum<sup>92</sup>. Największe korzyści dla środowiska naturalnego daje ograniczenie nadmiernej konsumpcji oraz powtórne użycie produktów. Stosowanie zasady 3R powoduje – poza ochroną środowiska naturalnego – spadek kosztów operacyjnych z tytułu mniejszego zużycia materiałów, redukcję kosztów obsługi odpadów, zmniejszenie nakładów pracy i wzrost wydajności.

---

<sup>89</sup> J. Szoltysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 91.

<sup>90</sup> R. Królik, P. Nowodziński, *Logistyka zagospodarowania odpadów zielonych – systemowe rozwiązania*, „Handel Wewnętrzny” 2012, 3, s. 64.

<sup>91</sup> K. Bebak, *Problem zagospodarowywania odpadów w kontekście ochrony środowiska*, „Logistyka” 2002, 5, s. 30-31.

<sup>92</sup> D.M. Schroeder, A.G. Robinson, *Green is Free: Creating Sustainable Competitive Advantage through Green Excellence*, „Organizational Dynamics” 2010, 39, s. 346-347.

Kontrolowanie przepływów zwrotnych pociąga za sobą przedsięwzięcie takich specyficznych czynności, jak: prognozowanie podaży i popytu na odpady nadające się do odzysku, planowanie lokalizacji punktów składowania zwrotów, określenie struktury systemu logistyki zwrotnej, koordynowanie działań mających na celu planowanie i kontrolę procesów związanych z logistyką zwrotną, wycena produktów wyprodukowanych z surowców wtórnych<sup>93</sup>.

J. Szołtysek wymienia główne składniki logistycznego systemu gospodarki odpadami. Są to podsystemy gromadzenia i wywozu odpadów oraz gospodarczego wykorzystania, przetworzenia lub unieszkodliwiania odpadów zgodnie z hierarchią odzyskiwania wartości z odpadów<sup>94</sup>. Model procesów związanych z produkcją oraz gospodarką odpadami został przedstawiony na rysunku 1.4. Przepływy obejmujące logistykę zwrotną zaznaczono kolorem zielonym, natomiast procesy produkcyjne kolorem niebieskim.

Warunkiem prawidłowego funkcjonowania gospodarki odpadami jest stworzenie jej zintegrowanego systemu. Według J. Szołtyśka wraz z rozwojem cywilizacyjnym i wzrastającą liczbą odpadów i produktów ubocznych zaistniała konieczność wpisania zagadnień związanych z gospodarką odpadami do systemu logistyki zwrotnej. Rozszerzenie logistyki zwrotnej o gospodarkę odpadami uzasadnia wybór systemowego podejścia do gospodarowania odpadami w skali mikro (przedsiębiorstwo), mezo (miasto, gmina) oraz makro (łańcuch dostaw, region, kraj)<sup>95</sup>.

Przyczyny rozwoju systemów logistyki zwrotnej zostały ujęte w pracy autorów Z. Lu i N. Bostel<sup>96</sup>, którzy zwrócili uwagę na to, iż w coraz większej liczbie podmiotów następują znaczne zmiany w budowie, funkcjonowaniu i wdrażaniu systemów logistyki zwrotnej, obsługujących przepływ towarów od klientów do ich producentów. Jest to wynikiem zmian zarówno legislacyjnych, jak i przepisów ochrony środowiska. Równie ważnym czynnikiem jest możliwość odzyskania części surowców użytych do produkcji, co daje wymierne korzyści, w tym także oszczędności przy ich wtórnym wykorzystaniu.

Projektowanie systemu logistyki zwrotnej w przedsiębiorstwie wymaga odpowiedzi na pytania dotyczące istotnych kwestii. Kto będzie odpowiedzialny za dystrybucję zwrotną? Jakie zadania będą wykonane i gdzie będą zlokalizowane? Jaki jest stopień integracji kanałów przepływów w logistyce i logistyce zwrotnej? Wśród podmiotów odpowiedzialnych za dystrybucję zwrotną należy wymienić głównych udziałowców w łańcuchu dostaw, czyli wytwórców. Detaliści również powinni być uwzględnieni w łańcuchu przepływu, w tym zwrotnego. Zwiększenie

---

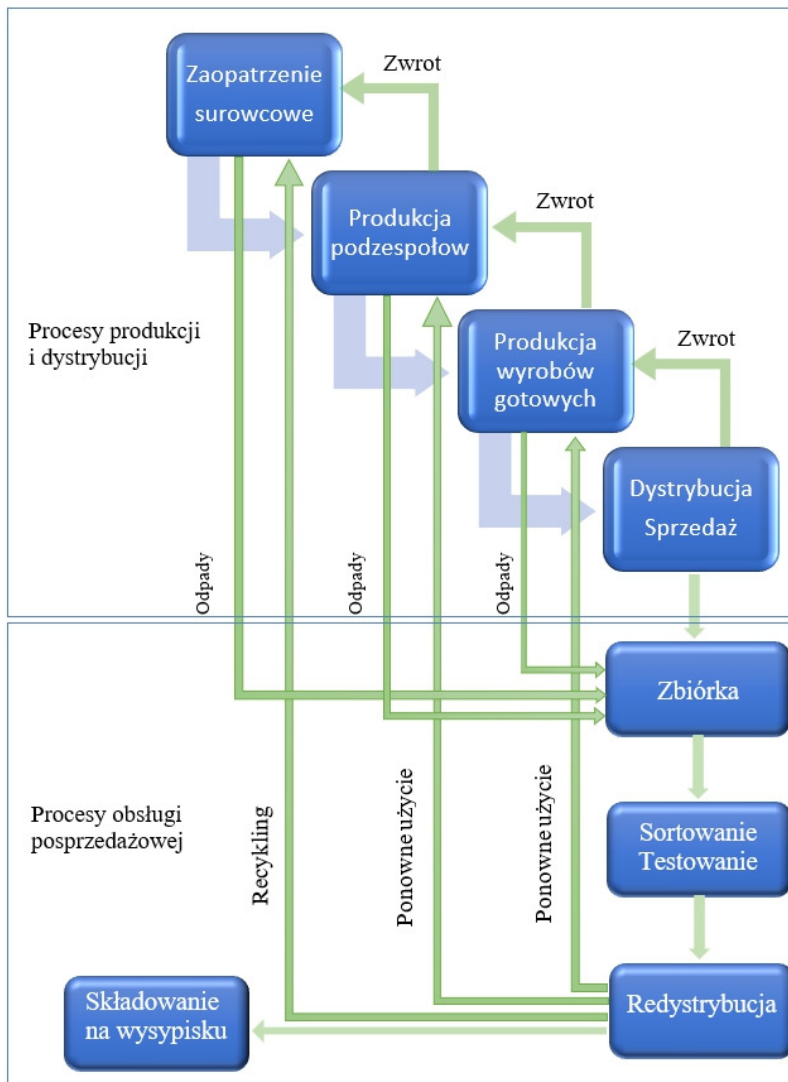
<sup>93</sup> A. Mesjasz-Lech, *Makroekonomiczne aspekty...*, op. cit., s. 449.

<sup>94</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 91.

<sup>95</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 89.

<sup>96</sup> Z. Lu, N. Bostel, *A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows: The Case of Remanufacturing Activities*, „Computers & Operations Research” 2007, 34, s. 299-323.

roli detalistów w systemie logistycznym jest kluczowe dla spójności przepływu towarów i informacji w obu kierunkach.



**Rysunek 1.4. Model systemu przepływu zasobów**

Źródło: opracowanie własne

Do zadań, które będą wykonywane w obszarze logistyki zwrotnej, należy zaliczyć m.in. zbiórkę, testowanie, sortowanie i transportowanie. Miejsce i kolejność wykonywania tych zadań również jest istotnym elementem systemu logistyki zwrotnej, pozwalającym na uniknięcie dodatkowych kosztów. Wczesne testowanie pozwala np. uniknąć zbędnego transportowania, natomiast sortowanie

wymaga sprawnego transportowania do odpowiednich miejsc. Odpowiedź na pytanie dotyczące integracji kanałów przepływów w logistyce tradycyjnej i logistyce zwrotnej podnosi zagadnienie zamkniętej pętli przepływów materiałowych (z ang. *closed loop supply chain*). Trudność polega nie tylko na organizowaniu przepływu w obu kierunkach w jednym systemie, lecz również na nadzorowaniu dwóch przeciwstawnych przepływów. Należy pamiętać o tym, iż w zdecydowanej większości przypadków nie jest to przepływ symetryczny, wymagający zróżnicowanej infrastruktury<sup>97</sup>.

W zależności od klasyfikacji obiektów podlegających zwrotowi, zaproponowanej w publikacji M. Fleischmanna i innych<sup>98</sup>, oraz głównych opcji odzysku sklasyfikowanych w publikacji autorów M. Thierry i inni<sup>99</sup>, zostały określone cztery główne podsystemy funkcjonalne logistyki zwrotnej<sup>100</sup>:

- DRN (ang. *Directly Reusable Network*) – sieć bezpośredniego ponownego użycia;
- RMN (ang. *Remanufacturing Network*) – sieć powtórnego wykorzystania;
- RSN (ang. *Repair Service Network*) – sieć napraw serwisowych;
- RN (ang. *Recycling Network*) – sieć recyklingu.

Oprócz nich wymienia się dwa kolejne typy: skoordynowanej logistyki zwrotnej – CRL (ang. *Coordinated Reverse Logistics*) oraz systemy zwrotnej produkcji (ang. *Reverse Production System*).

Cechą charakterystyczną systemu DRN jest obsługa zwróconych towarów, często nierozpakowanych, oraz przedmiotów gotowych do użycia, np. palet, pudeł, standardowych pojemników. System ten obsługuje przedmioty, które mogą być bezpośrednio użyte po raz kolejny bez żadnych dodatkowych operacji na nich. Przepływ „do przodu” i przepływ „zwrotny” są ze sobą zwykle związane, dlatego tego typu rozwiązania funkcjonują na zasadzie zamkniętej sieci o zdecentralizowanym charakterze. M. Fleischmann i in.<sup>101</sup> wskazują jako istotne dla tego systemu czynniki: czas zwrotu i zapewnienie zaopatrzenia. „Obróbka” zwrotów w tym typie sieci nie wymaga dużego nakładu pracy. Sieć DRN ma uproszczoną budowę charakteryzującą się zlokalizowaniem w określonym miejscu czynności takich jak czyszczenie i inspekcja. Uproszczenia w budowie sieci wynikają z jej charakteru i małych różnic pomiędzy wpływającymi i opuszczającymi sieć obiektami. Umożliwia to „centralizację”, co przy niewielkiej liczbie kroków „obróbki” dostarczanych obiektów w systemie DRN powoduje, że największą

---

<sup>97</sup> M. Fleischmann i in., *Quantitative Models for...*, op. cit., s. 4-5.

<sup>98</sup> Ibidem, s. 1-17.

<sup>99</sup> M.C. Thierry i in., *Strategic Issues in Product Recovery Management*, „California Management Review” 1995, 37, 2, s. 114-135.

<sup>100</sup> Z. Lu, N. Bostel, *A Facility Location...*, op. cit., s. 299-323.

<sup>101</sup> M. Fleischmann i in., *Quantitative Models for...*, op. cit., s. 1-17.

część kosztów stanowią koszty transportu. Zastosowanie tego typu rozwiązań występuje w przypadku takich towarów, jak: butelki, skrzynie, palety czy plastikowe pojemniki.

W budowie systemu RMN wyróżnić można cztery główne elementy: klienci, centra pośredniczące (ang. *intermediate centers*), centra wtórnego wykorzystania (ang. *remanufacturing centers*) oraz producenci<sup>102</sup>. Po stronie klientów są oczekiwania dotyczące produktów oraz zużyte produkty gotowe do odzysku. Centra pośredniczące są elementem występującym tylko w kanałach przepływu logistyki zwrotnej. Do głównych i najczęściej wykonywanych zadań zaliczyć należy: czyszczenie, demontaż, testowanie oraz sortowanie przed przesłaniem dalej produktów lub zwrotów. Oprócz wymienionych czynności centra pośredniczące przesyłają dalej produkty sprawdzone i posortowane do centrów wtórnego wykorzystania. Cechą specyficzną dla centrów wtórnego wykorzystania jest to, że obsługują one produkty bardzo różniące się jakością i możliwościami odzysku<sup>103</sup>. Dlatego często ten kanał przepływu określa się mianem kanału EOL (ang. *end-of-life*) danego produktu<sup>104</sup>. Centra wtórnego wykorzystania obejmują dwukierunkowy przepływ. Przepływ „wstecz” dotyczący zużytych produktów od klientów poprzez centra pośredniczące do centrów wtórnego wykorzystania. Drugi rodzaj przepływu „do przodu” dotyczy nowych produktów z centrów wtórnego wykorzystania do producentów lub bezpośrednio do klientów. Odbywa się bez przechodzenia przez centra pośredniczące<sup>105</sup>. Powtórne wykorzystanie produktów umożliwia zaoszczędzenie 85% energii, jaka zostałaby użyta do produkcji nowego towaru. Dlatego regeneracja (ang. *remanufacturing*) może być traktowana jako alternatywna metoda redukcji wpływu środowiskowego masowej produkcji<sup>106</sup>. Klasycznym przykładem towarów podlegających powtórnemu użyciu są tonery do drukarek<sup>107</sup>.

RSN obsługuje wadliwe produkty, takie jak trwałe dobra lub sprzęt elektroniczny. Są one zwracane i naprawiane w centrach naprawczych. Występują tu połączenia pomiędzy przepływami „do przodu” i „wstecz”, stąd ten podsystem logistyki ma charakter otwarty. Natomiast RN najczęściej obejmuje niemal wyłącznie odzysk przez wyspecjalizowane firmy surowców takich jak metal,

---

<sup>102</sup> Z. Lu, N. Bostel, *A Facility Location...*, op. cit., s. 299-323.

<sup>103</sup> S. Hahler, M. Fleischmann, *The Value of Acquisition Price Differentiation in Reverse Logistics*, „Journal Business and Economy” 2013, 83, s. 1-28.

<sup>104</sup> A. El Korchi, D. Millet, *Designing a Sustainable Reverse Logistics Channel: The 18 Generic Structures Framework*, „Journal of Cleaner Production” 2011, 19, s. 588-597.

<sup>105</sup> Z. Lu, N. Bostel, *A Facility Location...*, op. cit., s. 299-323.

<sup>106</sup> M.Y. Jaber, A.M.A. Saadany, *An Economic Production and Remanufacturing Model with Learning Effects*, „International Journal Production Economics” 2011, 131, s. 115-127.

<sup>107</sup> K.S. Jung, H. Hwang, *Competition and Cooperation in a Remanufacturing System with Take-Back Requirement*, „Journal Intelligent Manufacture” 2011, 22, s. 247-433.



szkło i papier. Systemy recyklingu obejmują również składowanie odpadów i ich eliminację<sup>108</sup>.

Jednym z systemów logistyki zwrotnej dotyczącej składowania odpadów jest CRL (ang. *Coordinated Reverse Logistics management system*). Systemy te nabierają szczególnego znaczenia w przypadku zarządzania niebezpiecznymi odpadami z określonego regionu (np. klastr przedsiębiorstw wysokich technologii). Model analityczny stosowany w tych rozwiązaniach minimalizuje zarówno koszty obsługi logistyki zwrotnej na tym obszarze, jak i ryzyko dla środowiska. W porównaniu do tradycyjnych rozwiązań logistyki zwrotnej CRL może posiadać trzy cechy charakterystyczne<sup>109</sup>:

- Głównym celem jest optymalizacja procesów przetwarzania odpadów z wielu źródeł z określonego obszaru z uwzględnieniem ochrony środowiska na tym obszarze, a nie optymalizacja tylko w obrębie danej organizacji.
- Koncentrowanie odpadów na określonym obszarze jest skoordynowane ze współpracą wytwórców odpadów w zakresie określonych standardów zbierania, transportu i składowania. Może też obejmować tworzenie regionalnych centrów przetwarzania.
- Różnorodność samych odpadów oraz materiałów, jakie zawierają odpady, wymaga skomplikowanych rozwiązań przestrzegających przepisów ochrony środowiska na obszarze ich składowania. Dlatego też systemy CRL będą poszukiwać kompromisu pomiędzy redukcją kosztów operacyjnych logistyki zwrotnej a minimalizacją wpływu na środowisko naturalne.

Zarządzanie przepływem odpadów w przedsiębiorstwie wymaga zatem odpowiedniego zaprojektowania systemu logistyki zwrotnej, nazwanego RPS (ang. *Reverse Production System*), czyli zwrótnym systemem produkcji<sup>110</sup>. Zaprojektowanie takiego systemu wymaga podjęcia szeregu decyzji dotyczących:

- liczby i wielkości miejsc składowania i przetwarzania odpadów;
- umiejscowienia poszczególnych elementów (funkcji) łańcucha dostaw w konkretnych lokalizacjach;
- tras przewozu poszczególnych materiałów i zużytych produktów (ze szczególnym uwzględnieniem niebezpiecznych);
- metod transportu pomiędzy lokalizacjami;
- wielkości składowanego materiału w każdej z końcowych lokalizacji.

---

<sup>108</sup> X. Zhou, M. Zhang, *Research on Reverse Logistics Network Design of Household Appliances Based on Green Logistics*, „International Journal of Business and Management” 2009, 4, 9, s. 251-256.

<sup>109</sup> J.B. Sheu, *A Coordinated Reverse Logistics System for Regional Management of Multi-Source Hazardous Wastes*, „Computers & Operations Research” 2007, 34, s. 1443.

<sup>110</sup> M.J. Realf, J.C. Ammons, D. Newton, *Strategic Design...*, op. cit., s. 991-996.

M. Realff, J.C. Ammons i D. Newton<sup>111</sup> wskazują na dwa główne czynniki wpływające na kształt systemu RPS: częstotliwość i zmienność okresu używania produktu przed jego utylizacją oraz złożoność samego produktu zarówno w jego konstrukcji, jak i materiałach użytych dla jego produkcji. Przykładami obrazującymi te zagadnienia są według autorów butelki typu PET i aluminiowe puszki, będące w obiegu przez kilka tygodni, oraz – na przeciwległym końcu – gazety wydawane codziennie.

Systemy logistyki zwrotnej dają możliwość sprawnego i efektywnego zarządzania przepływami zwrotów między poszczególnymi podmiotami gospodarczymi. Tym samym pozwalają na zwiększenie kontroli tych przepływów. Najczęściej w ich skład wchodzi dwie grupy podmiotów: podmiot gromadzący zwroty czy też poddający je procesom służącym dostosowaniu ich do dalszego użytkowania oraz podmiot będący odbiorcą tych zwrotów w celu ponownego ich wykorzystania. Należy zatem zbudować takie powiązania między miejscami powstania odpadów, ich przetwarzania lub unieszkodliwienia oraz miejscami powtórnego zagospodarowania, aby zminimalizować ilość odpadów, które będą składowane. Ponowne włączenie odpadów do systemu powinno uwzględniać ekonomiczność danego procesu. Wykorzystanie odpadów jako surowców wtórnych nie zawsze jest korzystne. Czasem cena surowców pierwotnych jest niższa, a przetwarzanie surowców wtórnych jest bardzo pracochłonne. Poza tym procesy służące adaptacji odpadów, tak by nadawały się do powtórnego zagospodarowania, mogą mieć negatywny wpływ na środowisko naturalne. Stąd pożądany będzie system zgodny z wymogami ochrony środowiska, ale również efektywny ekonomicznie oraz mogący działać w gospodarce rynkowej<sup>112</sup>. Tym samym niezbędna jest integracja systemu gospodarki odpadami, zorientowanego głównie na ekonomiczność i ekologiczność procesów zachodzących wewnątrz jego samego, z logistyką zwrótną ukierunkowaną na korzyści dla całego systemu, jakim jest przedsiębiorstwo lub łańcuch dostaw.

---

<sup>111</sup> Ibidem.

<sup>112</sup> A. Mesjasz-Lech, *Makroekonomiczne aspekty...*, op. cit., s. 450-451.

## Rozdział 2

# System gospodarki odpadami w przedsiębiorstwie produkcyjnym a logistyka zwrotna

### 2.1. Regulacje prawne dotyczące gospodarki odpadami

Większość gałęzi gospodarki wiąże się z wytwarzaniem jakiegoś rodzaju odpadów. W coraz bardziej konkurencyjnym otoczeniu znaczenia w przedsiębiorstwach nabiera logistyka zwrotna. Często bardziej istotne od samego zysku przedsiębiorstwa z nią związanego są zagadnienia prawne dotyczące gospodarki odpadami. Ponadto w przypadku przedsiębiorstw działających na rynkach międzynarodowych dochodzą zagraniczne kwestie prawne związane z przetwarzaniem i obrotem odpadami oraz ochroną środowiska.

Jednym z powodów, dla których zwiększa się zainteresowanie logistyką zwrotną, jest ustawodawstwo oraz restrykcyjna polityka państwa w zakresie ochrony środowiska. Najważniejszym aktem prawnym w polskim prawodawstwie jest *Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej*<sup>113</sup>. Artykuł 86 *Konstytucji RP* zakłada, że: „Każdy jest obowiązany do dbałości o stan środowiska i ponosi odpowiedzialność za spowodowane przez siebie jego pogorszenie”. Odpowiedzialność nałożoną przez ustawodawcę należy rozumieć głównie jako zapobieganie powstawaniu uciążliwości dla środowiska. Jeśli takie zapobieganie nie jest możliwe, należy starać się ograniczać negatywny wpływ na środowisko bądź usuwać zaistniałe skutki, jakie działanie człowieka dla środowiska sprawiło.

Od 1 stycznia 1998 roku podstawowym aktem dotyczącym problemu odpadów była w Polsce Ustawa z dnia 27 czerwca 1997 r. o odpadach. Nie była ona w pełni zgodna z ustawodawstwem UE z powodu różnic w transformacji pojęć i definicji zawartych w podstawowych dyrektywach Unii (tj. dyrektyw o numerach 75/442 i 91/689). Rozbieżności dotyczyły definicji samych odpadów i odpadów niebezpiecznych. Mniejsza precyzja polskich definicji spowodowała rozszerzenie pojęcia „odpadów” o szereg materiałów i substancji, które w przepisach UE nie są do odpadów zaliczane. Skutkuje to rozszerzeniem niezbędnego nadzoru i kontroli nad dodatkowymi kategoriami odpadów. Założono, że w ustawie znajdują się zagadnienia ściśle dotyczące odpadów, zaś pozostałe (np. wymagania emisyjne czy też wymagania w stosunku do produktów) będą ujęte w projekcie

---

<sup>113</sup> *Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej* z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz.U. nr 78 poz. 483).

ustawy *Prawo ochrony środowiska*. Kategorią odpadów, która nie miała być objęta tą zasadą, są opakowania i odpady opakowaniowe, co wynika głównie ze specyficznych wymagań tzw. dyrektywy opakowaniowej, domagającej się odrębnej regulacji ustawowej w tym przypadku.

Z kolei w Ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach<sup>114</sup> zawarto zasady postępowania z odpadami, tak aby zminimalizować ich dewastacyjny wpływ na zdrowie ludzi oraz środowisko naturalne. Podano sposoby zapobiegania powstawaniu odpadów i zmniejszania ich ilości oraz nałożono na wytwórców odpadów różne obowiązki, m.in. obowiązek ewidencji tych odpadów.

Kolejne zmiany zostały wprowadzone wraz z wejściem w życie nowej ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku<sup>115</sup>. Jednym z głównych powodów jej uchwalenia była konieczność wprowadzenia do prawa polskiego dyrektywy z dnia 19 listopada 2008 roku w sprawie odpadów (2008/98/WE). Ustawa ta reguluje obowiązki wytwórców odpadów, posiadaczy odpadów, gospodarujących odpadami, sprzedawców odpadów i pośredników w obrocie odpadami oraz organów administracji publicznej w zakresie gospodarki odpadami. Zgodnie z jej zapisami gospodarka odpadami powinna być prowadzona w sposób zapewniający ochronę życia i zdrowia ludzi oraz środowiska. Dokument ten zawiera zasady dokonywania klasyfikacji odpadów, kryteria uznawania przedmiotów lub substancji za produkty uboczne, kryteria i przypadki, w których odpady będą mogły utracić status odpadów. Na szczególne podkreślenie zasługuje podtrzymanie obowiązku selektywnej zbiórki odpadów oraz zasady prowadzenia działalności w zakresie transportu odpadów w sposób zgodny z wymaganiami ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa życia i zdrowia ludzi. W ustawie tej założono, że odpady przetwarza się wyłącznie w instytucjach lub urządzeniach, które mogą być eksploatowane tylko wówczas, gdy spełniają wymagania ochrony środowiska.

Od 2001 roku polskie przepisy dotyczące postępowania z odpadami są powiązane z regulacjami unijnymi, więc zmiany w tych drugich powodują zmiany w prawodawstwie polskim. Przepisy UE stanowią w chwili obecnej system aktów prawnych realizujących wytyczne zawarte w aktach programowych (tzw. strategie i plany działania). Podstawowym aktem prawnym ustalającym cele i zadania dotyczące właściwego postępowania z odpadami jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (dyrektywa ramowa). Pozostałe najważniejsze europejskie akty prawne dotyczące odpadów to:

- Dyrektywa Rady Europy 75/422/EWG z 15 lipca 1975 r. o odpadach (przepisy jej zostały wzmocnione Dyrektywą Rady Europy 91/156/EWG z dnia

---

<sup>114</sup> Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 628).

<sup>115</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).

18 marca 1991 r., w której państwa członkowskie zostały zobowiązane do wprowadzenia u siebie ustaw i aktów normatywnych, aby osiągnąć zgodność z dyrektywą najpóźniej do 1 kwietnia 1993 r.). Dyrektywa ta obliguje państwa członkowskie do postępowania z odpadami w taki sposób, aby nie powodowały zagrożenia dla wody, powietrza, gleby, roślin oraz zwierząt, nie były przyczyną hałasu i odoru, a także nie miały szkodliwego wpływu na tereny wiejskie lub miejsca objęte szczególną ochroną.

- Decyzja Komisji Rady Europy z dnia 21 kwietnia 1976 r. dotycząca utworzenia Komitetu ds. gospodarki odpadami.
- Dyrektywa Rady Europy 86/278 z dnia 12 czerwca 1986 r. o ochronie środowiska, a zwłaszcza gleb przy rolniczym wykorzystaniu osadów z oczyszczalni ścieków.
- Dyrektywa Rady Europy 89/369/EWG z dnia 8 czerwca 1989 r. w sprawie zapobiegania zanieczyszczenia powietrza przez nowe zakłady spalania odpadów komunalnych.
- Dyrektywa Rady Europy 89/429/EWG z dnia 21 czerwca 1989 r. w sprawie minimalizacji zanieczyszczenia powietrza przez istniejące zakłady spalania odpadów komunalnych.
- Dyrektywa Rady Europy 91/689/EWG z 1991 r. o odpadach niebezpiecznych zastępująca wcześniejszą Dyrektywę Rady 78/319/EWG z 20 marca 1978 r. w sprawie odpadów toksycznych i niebezpiecznych.
- Decyzja 94/2/WE z dnia 20 grudnia 1994 r. ustanawiająca listę 29 grup odpadów (podział w zależności od miejsca ich wytworzenia) przyjęta przez KWE zgodnie z art.1 pkt. a dyrektywy Rady Europy 75/442/EWG w sprawie odpadów.
- Decyzja Rady Europy 94/904/WE z dnia 22 grudnia 1994 r. ustanawiająca listę odpadów niebezpiecznych i określająca kryteria, które te odpady muszą spełnić.
- Dyrektywa Rady Europy 93/259/EWG z dnia 1 lutego 1993 r. w sprawie nadzoru i kontroli przesyłania odpadów do Wspólnoty, w jej obrębie oraz poza jej obszar, w której oddzielnie omówiono przesyłanie odpadów pomiędzy państwami członkowskimi z przeznaczeniem do usuwania oraz do regeneracji, a także przesyłanie odpadów w obrębie państw członkowskich. Dyrektywa ta zastąpiła Dyrektywę 84/631/EWG z dnia 6 grudnia 1984 r. w sprawie nadzoru i kontroli na obszarze Unii Europejskiej transgranicznego przesyłania odpadów niebezpiecznych.
- Dyrektywa Rady Europy 94/67 z 1994 r. w sprawie spalania odpadów niebezpiecznych.
- Dyrektywa Rady Europy 1999/31/EC z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie ziemnych składowisk odpadów.

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2000/76/WE z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania odpadów<sup>116</sup>.

Ogólnie koncepcja Unii Europejskiej w sprawie gospodarki odpadami obejmuje pięć postulatów<sup>117</sup>:

- wybór technologii prowadzących w jak najmniejszym stopniu do generowania odpadów;
- użycie odpadów jako surowców wtórnych i źródła energii;
- odpowiednie pozbywanie się odpadów;
- ustanowienie właściwych aktów prawnych dotyczących transportu;
- naprawa i odbudowa środowiska naturalnego.

W Unii Europejskiej odpady określa się jako „substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany”<sup>118</sup>. Przez „usuwanie” określa się wszystkie procesy, które nie prowadzą do możliwości odzyskania zasobów. Wykaz procesów unieszkodliwiania (niewyczerpujący tego zagadnienia) zamieszczono w załączniku nr 2 do Ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Usuwanie odpadów może odbywać się poprzez składowanie lub przetwarzanie w ziemi lub na jej powierzchni, odprowadzenie w głąb ziemi, retencję powierzchniową, składowanie na składowiskach w sposób celowo zaprojektowany, odprowadzenie do wód powierzchniowych z wyłączeniem mórz i oceanów, odprowadzanie do mórz i oceanów, w tym lokowanie na ich dnie, spalanie na ziemi lub morzu, składowanie stałe, składowanie pośrednie na czas zastosowania jednego z wyżej wymienionych sposobów<sup>119</sup>.

Przez „odzyskiwanie” rozumie się proces, dzięki któremu odpady stają się użyteczne. Są to takie operacje, jak: użycie jako paliwa albo jako środka do wytwarzania energii, odzyskiwanie lub regeneracja rozpuszczalników, recykling lub odzysk substancji organicznych nieużywanych jako rozpuszczalniki, metali i ich związków oraz innych materiałów nieorganicznych, regeneracja kwasów lub zasad, odzyskiwanie niektórych komponentów odpadów w celu obniżenia w nich zawartości zanieczyszczeń, odzyskiwanie części z katalizatorów, wykorzystanie odpadów przez wprowadzenie ich do gleby, gromadzenie w celu poddania ich któremukolwiek z działań wymienionych wcześniej<sup>120</sup>.

---

<sup>116</sup> C. Rosik-Dulewska, *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002, s. 12; J. Szołtysek: *Logistyka...*, op. cit., s. 65.

<sup>117</sup> C. Rosik-Dulewska, *Podstawy gospodarki...*, op. cit., s. 12-13.

<sup>118</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).

<sup>119</sup> Ibidem, Załącznik nr 2.

<sup>120</sup> Ibidem, Załącznik nr 1.

Międzynarodowe prawo ochrony środowiska powstało w wyniku konieczności przeciwdziałania rosnącemu zagrożeniu dla środowiska naturalnego. Wyrazem tej potrzeby była konferencja sztokholmska Narodów Zjednoczonych „Człowiek i jego środowisko”, która odbyła się w czerwcu 1972 roku. Konferencja ta miała znaczenie przełomowe i przeszła do historii jako Konferencja Sztokholmska<sup>121</sup>. Uczestniczyło w niej 113 państw reprezentujących prawie całą społeczność międzynarodową. Efektem tego spotkania była *Deklaracja Sztokholmska* zawierająca:

- 26 zasad ochrony środowiska;
- międzynarodowy plan działania, obejmujący 109 swoistych rekomendacji do działania na rzecz ochrony środowiska;
- postanowienia instytucjonalne i finansowe, m.in. dotyczące utworzenia organizacji międzynarodowej pod nazwą Program Narodów Zjednoczonych Ochrony Środowiska (UNEP).

Ustalenia i postanowienia podjęte na tej konferencji stanowią merytoryczny trzon międzynarodowego prawa ochrony środowiska. Zostały one potwierdzone w Traktacie o Unii Europejskiej z Maastricht z 7 lutego 1992 roku. Rozwiązania wprowadzone w 1972 roku były kontynuowane przez Unię Europejską. Zasady zrównoważonego rozwoju zostały uznane za podstawę polityki ochrony środowiska. Celem całej Unii Europejskiej jest nie tylko poszanowanie i ochrona środowiska naturalnego, lecz również harmonijny i zrównoważony rozwój bez negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Łącznie uchwalono około 90 dyrektyw i rozporządzeń oraz szereg innych decyzji i przepisów regulujących zagadnienia o charakterze ekologicznym. Dodatkowo ujednolicono 100 innych dyrektyw<sup>122</sup>. Logistykę zwrotną można uznać za ważny element zrównoważonego rozwoju, który ogólnie jest zdefiniowany jako zaspokajanie potrzeb obecnych pokoleń bez umniejszania szans na ich zaspokojenie przez pokolenia przyszłe. Zastosowanie rozwiązań logistyki zwrotnej daje możliwość monitorowania stopnia zużycia oraz ponownego wykorzystywania produktów<sup>123</sup>.

Obecnie system, nazywany polityką ekologiczną Unii Europejskiej, zawiera cztery główne elementy<sup>124</sup>:

- prawo pierwotne Unii Europejskiej,
- dyrektywy Unii Europejskiej,
- umowy międzynarodowe w dziedzinie ochrony środowiska,
- narodową politykę ekologiczną poszczególnych państw.

---

<sup>121</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 61.

<sup>122</sup> Ibidem, s. 62.

<sup>123</sup> S. Kot, *Nowe kierunki rozwoju logistyki*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, s. 72.

<sup>124</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 62.

*Deklaracja Sztokholmska* dzieli zasady gospodarowania środowiskiem naturalnym na dwie podstawowe grupy<sup>125</sup>:

- ogólne zasady prawa międzynarodowego w postaci dyrektyw ogólnych;
- zasady szczegółowe, takie jak np.: obowiązek współpracy międzynarodowej w zakresie ochrony środowiska, obowiązek zawierania umów w zakresie ochrony środowiska i eksploatacji zasobów, obowiązek informowania i konsultacji z państwami, z którymi dzielone są zasoby, w sprawie działań mających wpływ na stan naturalny tych zasobów, uwzględnienie zasady racjonalności i słuszności przy użytkowaniu i podziale korzyści, wolność badań naukowych dotyczących ochrony środowiska, obowiązek ostrzegania i informowania o zdarzeniach niebezpiecznych, odpowiedzialność międzynarodową za zniszczenia i szkody w środowisku oraz obowiązek pokojowego wykorzystania zasobów naturalnych.

Wytyczne skutecznego systemu gospodarowania odpadami zostały określone w dyrektywie ramowej dotyczącej odpadów oraz dyrektywie o odpadach niebezpiecznych, a uzupełnione przez dwie grupy dyrektyw szczegółowych:

- grupę dyrektyw szczegółowych określających wymogi dotyczące udzielania zezwoleń i eksploatacji zakładów usuwania odpadów;
- grupę dyrektyw szczegółowych zawierających postanowienia dotyczące poszczególnych rodzajów odpadów, jak np. olejów, opakowań i baterii, oraz rozporządzeń określających zasady przepływu odpadów.

Poprawki dyrektywy ramowej 75/442/EEC o odpadach z 1991 roku usunęły opisową definicję wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów na rzecz bardziej szczegółowej listy czynności polegających na unieszkodliwianiu odpadów (Aneks II A) oraz listy czynności prowadzących do odzysku (wykorzystania) odpadów (Aneks II B)<sup>126</sup>.

W Europie szczególnie ważną kwestią związaną z logistyką zwrotną jest ochrona środowiska naturalnego. Dlatego regulacje prawne obejmujące ten obszar są bardzo istotnym czynnikiem kształtującym działania logistyki zwrotnej. Znajomość regulacji prawnych w zakresie postępowania odpadami determinuje aktywność przedsiębiorstw, które jako wytwórcy odpadów zobowiązane są do przestrzegania zasad gospodarowania odpadami zawartych zarówno w prawie europejskim, jak i krajowym.

---

<sup>125</sup> Ibidem, s. 63.

<sup>126</sup> M. Władarz, *Gospodarka odpadami. Poradnik przedsiębiorcy*, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, Warszawa 2003, s. 21.



## 2.2. Definicja i klasyfikacja odpadów jako obiektów logistyki zwrotnej

Produkcja odpadów jest nieodłączną cechą aktywności gospodarczej człowieka, a ich zagospodarowanie problemem wszystkich społeczeństw. Ustawa z dnia 27 czerwca 1997 roku o odpadach określa odpady jako: „wszystkie przedmioty oraz substancje stałe, a także niebędące ściekami substancje ciekłe powstałe w wyniku prowadzonej działalności gospodarczej lub bytowania człowieka i nieprzydatne w miejscu i czasie, w którym powstały”<sup>127</sup>. Jednak w innym miejscu lub czasie mogą być surowcem, półproduktem, a nawet produktem. Dlatego umiejętne wykorzystywanie odpadów przynosi wiele korzyści zarówno ekonomicznych, jak i ekologicznych. Powstawanie odpadów jest nieuniknione, jednak większość odpadów po odpowiednim zagospodarowaniu staje się przydatna.

Brak optymalnych rozwiązań w zakresie gospodarki odpadami może spowodować wzrost zarówno masy odpadów, jak i poziomu zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Dlatego też odpowiednie zarządzanie strumieniami odpadów jest istotnym elementem działalności przedsiębiorstw. Jego korzystny wpływ przejawia się w redukcji ilości przepływu i zużycia materiałów, ale również w minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Niestety jest to proces niełatwy – złożony, wieloetapowy oraz wymagający weryfikacji na każdym etapie jego konstrukcji<sup>128</sup>.

Wdrożenie systemowych rozwiązań w ramach logistyki zwrotnej przedsiębiorstwa produkcyjnego wymaga dokładnego zdefiniowania pojęcia obiektów logistyki zwrotnej, w tym odpadów. Cele i zadania logistyki zwrotnej powinny być w określonym zakresie zgodne z celami gospodarki odpadami przedsiębiorstw. Ta zależność celów i zadań obu obszarów wynika z Dyrektywy 2008/98/WE z 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów<sup>129</sup>.

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach określa odpady jako „każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany”<sup>130</sup>. Według J. Szołtyśka odpady można zdefiniować jako „uboczne produkty działalności człowieka, nieprzydatne w miejscu i w czasie, w którym powstały, szkodliwe lub uciążliwe dla środowiska przyrodniczego”<sup>131</sup>. Wspomniane definicje nie wyczerpują tematu klasyfikacji odpadów. Wśród kryteriów klasyfikacji odpadów wyróżnia się:

---

<sup>127</sup> Ustawa z dnia 27 czerwca 1997 roku o odpadach (Dz.U. 1997 nr 96).

<sup>128</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna...*, op. cit., s. 35.

<sup>129</sup> K. Witkowski, *Processes of Reverse Logistics and Recycling of Plastics in Automotive Industry*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2012, s. 37.

<sup>130</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).

<sup>131</sup> J. Szołtysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 157.

źródła powstawania, stopień uciążliwości bądź stwarzania zagrożeń dla życia lub zdrowia ludzi oraz dla środowiska<sup>132</sup>. Ponadto w problematyce odnoszącej się do ochrony środowiska rozpatruje się i klasyfikuje odpady jako substancje pochodzące z produkcji lub konsumpcji, które powodują zanieczyszczenie środowiska naturalnego. O stopniu toksyczności odpadów oraz ich złym wpływie na środowisko decydują następujące czynniki<sup>133</sup>:

- składnik najniebezpieczniejszy, który wyznacza przynależność odpadów do odpowiedniej kategorii szkodliwości oraz określa technologię jego utylizacji;
- toksyczność i szkodliwość odpadu dla organizmów żywych;
- właściwości rakotwórcze substancji odpadowych;
- zagrożenie dla wód powierzchniowych i gleby na podstawie wielkości dopuszczalnych zanieczyszczeń śródlądowych wód powierzchniowych I klasy czystości;
- zanieczyszczenie atmosfery przez odpady pyłące, wydzielające pary lub gazy szkodliwe i o nieprzyjemnym zapachu;
- łatwość zapłonu.

Odpady podzielono również na<sup>134</sup>:

- grupy (odpady o wspólnym pochodzeniu i jednakowych właściwościach);
- typy (odpady bliskie pod względem głównych składników i właściwości);
- gatunki (dokładniej niż typ określają chemiczne, fizyczne i biologiczne właściwości);
- rodzaje (określają specyficzne właściwości odpadu w ramach gatunku), a w razie konieczności także na odmiany.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, odpady w zależności od źródła ich powstawania klasyfikuje się na 20 grup<sup>135</sup>:

- odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalin – 01;
- odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności – 02;
- odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury – 03;
- odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego – 04;

---

<sup>132</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 r. poz. 21).

<sup>133</sup> C. Rosik-Dulewska, *Podstawy gospodarki...*, op. cit., s. 24.

<sup>134</sup> Ibidem, s. 26.

<sup>135</sup> Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 nr 112 poz. 1206).

- odpady z przeróbki ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz pirolytycznej przeróbki węgla – 05;
- odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii nieorganicznej – 06;
- odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania produktów przemysłu chemii organicznej – 07;
- odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich – 08;
- odpady z przemysłu fotograficznego i usług fotograficznych – 09;
- odpady z procesów termicznych – 10;
- odpady z chemicznej obróbki i powlekania powierzchni metali oraz innych materiałów i z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych – 11;
- odpady z kształtowania oraz fizycznej i mechanicznej obróbki powierzchni metali i tworzyw sztucznych – 12;
- oleje odpadowe i odpady ciekłych paliw (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05, 12 i 19) – 13;
- odpady rozpuszczalników organicznych, chłodziw i propelentów (z wyłączeniem grup 07 i 08) – 14;
- odpady opakowaniowe, sorbenty, tkaniny do wycierania, materiały filtracyjne i ubrania ochronne, nieujęte w innych grupach – 15;
- odpady nieujęte w innych grupach – 16,
- odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę z terenów zanieczyszczonych) – 17;
- odpady medyczne i weterynaryjne – 18;
- odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych – 19;
- odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie – 20.

Ze względu na pochodzenie i charakter odpady dzieli się na odpady komunalne, odpady przemysłowe oraz odpady niebezpieczne<sup>136</sup>. Odpady bytowo-gospodarcze, zwane również odpadami komunalnymi, są definiowane aktami prawnymi rangi ustawy. Ustawa o odpadach z 14 grudnia 2012 roku definiuje odpady komunalne jako „odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów

---

<sup>136</sup> A. Kowalski, M. Żygadło, *Planowanie, zarządzanie i ochrona środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1998, s. 182.

powstających w gospodarstwach domowych”<sup>137</sup>. Wyróżnić możemy cztery podstawowe grupy odpadów komunalnych<sup>138</sup>:

- Grupa I to odpady traktowane jako surowce wtórne niekonsumpcyjne. Należą tu odpady papierowe, z tworzyw sztucznych, szkła, metali oraz tekstyliów, stanowiące ok. 30% masy odpadów komunalnych stałych.
- Grupę II stanowią odpady rzadko traktowane jako surowce wtórne. Są to odpady organiczne (biodegradowalne) takie jak resztki pożywienia, stanowiące ok. 50% masy odpadów komunalnych stałych.
- Do grupy III należą odpady paleniskowe pochodzące z sezonowego ogrzewania domostw (do 20% masy odpadów). Tego typu odpady nieorganiczne nie są rozpatrywane jako surowce wtórne.
- Grupa IV to dość nielicznie występujące odpady o znikomej wartości surowca wtórnego. Zaliczane tu są pozostałości z porządkowania domostw (np. wykorzystana chemia gospodarcza).

Kolejną liczną grupę stanowią odpady przemysłowe, które także wymagają zbiórki i odpowiedniego ich zagospodarowania. Odpady przemysłowe, zwane inaczej produkcyjnymi, wytwarzane są w wyniku prowadzenia działalności gospodarczej w różnych gałęziach przemysłu. Odpadami przemysłowymi są zatem wszelkie bezużyteczne produkty otrzymywane podczas procesu produkcyjnego. Do odpadów poprodukcyjnych można zaliczyć m.in. odpady magazynowe, odpady z oczyszczania ścieków czy odpady z przemysłu wydobywczego. Istnieje wiele czynników, które determinują ilość odpadów przemysłowych. Należą do nich np. rozwój cywilizacyjny, struktura przemysłu, poziom technologii oraz zaawansowanie gospodarki odpadami traktowanymi jako surowce wtórne<sup>139</sup>. Odpady przemysłowe stanowią większość wszystkich generowanych odpadów – 90% ich masy. Dlatego wymagają one największej uwagi oraz stworzenia odpowiednich rozwiązań. Zatem niezbędne stają się działania mające na celu przywrócenie tym odpadom ich użytkowej wartości w celu powtórnego wprowadzenia do systemu gospodarczego jako pełnowartościowych surowców i produktów<sup>140</sup>.

W 2021 roku wygenerowano w Polsce ponad 121 mln ton odpadów. Największą grupę odpadów stanowiły odpady przemysłowe – 107 712 tys. ton (z wyłączeniem odpadów komunalnych). Najwięcej odpadów wygenerowało górnictwo i wydobywanie – 61,9% odpadów ogółem. Drugie miejsce zajęło przetwórstwo przemysłowe, które stanowiło 22%. Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę wygenerowało 12,7% odpadów ogółem. W 2014 roku w Polsce odnotowano powstanie największej ilości odpadów

---

<sup>137</sup> Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21).

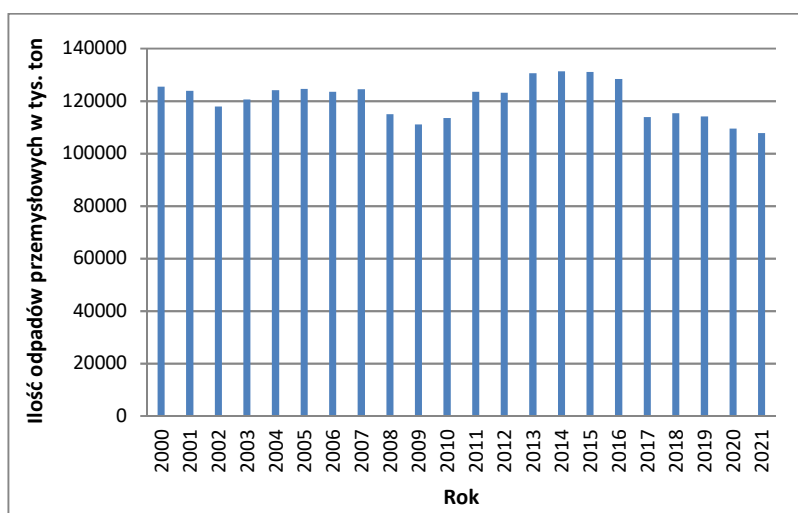
<sup>138</sup> C. Rosik-Dulewska, *Podstawy gospodarki...*, op. cit., s. 50-52.

<sup>139</sup> J. Szoltysek, *Logistyka...*, op. cit., s. 33.

<sup>140</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna...*, op. cit., s. 25.

przemysłowych – 131 256 tys. ton (rys. 2.1). Z ogólnej ilości odpadów wytworzonych w 2021 roku ok. 48% odpadów zostało poddanych odzyskowi, 44% poddano unieszkodliwieniu poprzez składowanie, a 7% unieszkodliwiono w inny sposób<sup>141</sup>.

Najczęściej główną przyczyną wytwarzania nadmiernej ilości odpadów przemysłowych jest nieracjonalne gospodarowanie nieodnawialnymi zasobami naturalnymi. Dlatego szczególnie skupiono się na badaniach tej grupy odpadów. Aby zahamować wzrost powstawania odpadów przemysłowych, konieczne staje się poszukiwanie nowych rozwiązań systemowych.



**Rysunek 2.1. Odpady przemysłowe wytworzone w Polsce w ciągu roku [w tysiącach ton]**

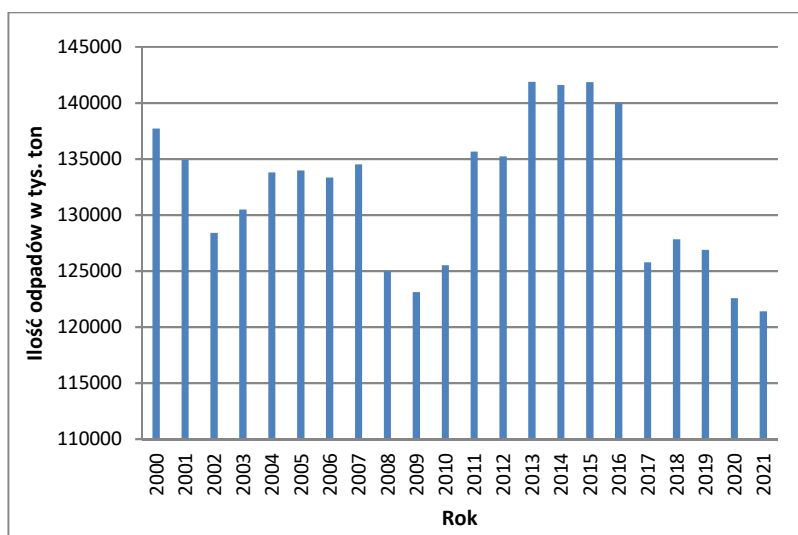
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pochodzących z Głównego Urzędu Statystycznego, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2021,1,22.html> [dostęp: 24.04.2023]

Kolejną grupę odpadów stanowią odpady niebezpieczne. Właściwości oraz składniki, które mogą powodować, że odpady są odpadami niebezpiecznymi, zostały przedstawione w załącznikach nr 3 i 4 do ustawy o odpadach z 2012 roku. Ponadto wyróżnia się odpady, które zgodnie z ustawą nazywane są odpadami medycznymi. Powstają one w wyniku udzielania świadczeń zdrowotnych oraz prowadzenia badań i doświadczeń naukowych w zakresie medycyny. Odpady medyczne zalicza się do odpadów niebezpiecznych. Takie zaszeregowanie odpadów medycznych limituje zastosowanie określonych technologii w ich utylizacji. Odpady medyczne powstają w różnych jednostkach opieki zdrowotnej.

<sup>141</sup> Główny Urząd Statystyczny, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2021,1,22.html> [dostęp: 24.04.2023].

Postępowanie z odpadami medycznymi reguluje Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 30 lipca 2010 r. w sprawie szczegółowego sposobu postępowania z odpadami medycznymi (Dz.U. 2010 nr 139 poz. 940).

W 2013 roku w Polsce odnotowano powstanie największej ilości odpadów – 141 888 tys. ton<sup>142</sup>. Analizując wykres 2.2, można zauważyć, że w 2017 roku odnotowano spadek o prawie 10% w stosunku do roku poprzedniego. W 2018 roku wytworzono 128 mln ton odpadów – nieznaczny wzrost względem roku poprzedniego (1,4%). W 2021 roku wystąpił zaledwie dwuprocentowy spadek ilości wytwarzanych odpadów względem roku poprzedniego. Ilość generowanych odpadów utrzymuje się na podobnym poziomie, przy stałym wzroście PKB, co może wskazywać na pozytywne trendy w gospodarce odpadami<sup>143</sup>. Jednak aby ograniczyć dalszy wzrost ilości wytwarzanych odpadów, należy wprowadzić nowe rozwiązania systemowe.



**Rysunek 2.2. Odpady wytworzone w Polsce w ciągu roku ogółem [w tysiącach ton]**

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pochodzących z Głównego Urzędu Statystycznego

Dodatkowo pojawiło się pojęcie „rozszerzonej odpowiedzialności”, które odnosi się do poczucia odpowiedzialności użytkowników za odpady przez nich pozostawiane<sup>144</sup>. W świecie globalnych powiązań, krótkiego cyklu życia

<sup>142</sup> Główny Urząd Statystyczny, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2022,1,23.html> [dostęp: 24.04.2023].

<sup>143</sup> Ibidem.

<sup>144</sup> M.J. Álvarez-Gil, *Reverse Logistics...*, op. cit., s. 463-473.

produktów zastępowanych przez kolejne, coraz nowsze modele, to właśnie użytkownicy wywierają presję na producentów w kwestii odpadów powstających po zużyciu produktów. Znane są rozwiązania mające na celu zagospodarowanie odpadów przez producentów z Kanady<sup>145</sup>, Brazylii<sup>146</sup>, Republiki Południowej Afryki<sup>147</sup> i Chin<sup>148</sup>. Najbardziej popularnymi przykładami „rozszerzonej odpowiedzialności” są akcje prowadzone przez globalne marki takie jak Nike, Dell czy Xerox<sup>149</sup>. Jednak to w Europie, a dokładniej w Niemczech, wprowadzono pierwszy program obejmujący odpowiedzialność producentów za zwroty towarów – już w 1991 roku. Według tych regulacji producent jest odpowiedzialny za zbiorczą, przechowywanie, sortowanie, recykling oraz pakowanie produktów. Kilka lat później Unia Europejska wprowadziła dyrektywę 94/62/EEC, według której firmy powinny poddać odzyskowi co najmniej 50% odpadów<sup>150</sup>. W przypadku przedsiębiorstw produkcyjnych odpowiedzialność za produkt po jego zużyciu jest szczególnie ważna, a uwzględnienie tego problemu powinno mieć miejsce w określaniu zasad planowania, organizacji i kontroli procesów logistyki zwrotnej.

### 2.3. Projektowanie produktów przyjaznych środowisku

Etap projektowania produktu jest najistotniejszym etapem w procesie produkcyjnym. To właśnie tutaj zapadają najważniejsze decyzje, które będą określały, w jakim stopniu produkt będzie przyjazny dla środowiska naturalnego. Projektowanie produktu oraz ekoprojektowanie mają wspólny cel – opracowanie produktu zgodnego z wymaganiami klienta i rynku. Jednak w przypadku ekoprojektowania projektanci uwzględniają również aspekty środowiskowe i zrównoważonego rozwoju.

Etapy projektowania produktu obejmują analizę potrzeb i wymagań klienta, koncepcję produktu, projektowanie, prototypowanie i produkcję. W przypadku ekoprojektowania projektanci analizują również cykl życia produktu, określają

---

<sup>145</sup> K. McKerlie, N. Knight, B. Thorpe, *Advancing Extended Producer Responsibility in Canada*, „Journal of Cleaner Production” 2006, 14, s. 616-628.

<sup>146</sup> B. Milanez, T. Buhrs, *Extended Producer Responsibility in Brazil: The Case of Tyre Waste*, „Journal of Cleaner Production” 2009, 17, s. 608-615.

<sup>147</sup> A. Nahman, *Extended Producer Responsibility for Packaging Waste in South Africa: Current Approaches and Lessons Learned*, „Resources, Conservation and Recycling” 2010, 54, s. 155-162.

<sup>148</sup> W. Xiang, C. Ming, *Implementing Extended Producer Responsibility: Vehicle Remanufacturing in China*, „Journal of Cleaner Production” 2011, 19, s. 680-686.

<sup>149</sup> K. Amaeshi, O. Osuji, P. Nnodim, *Corporate Social Responsibility in Supply Chains of Global Brands: A Boundaryless Responsibility? Clarifications, Exceptions and Implications*, *Journal of Business Ethics*” 2008, 81, 1, s. 223-234.

<sup>150</sup> M.W. Toffel, *Strategic Management...*, op. cit., s. 120-141.

wymagania środowiskowe, projektują produkt zgodnie z zasadami ekoprojektowania, weryfikują projekt i wprowadzają ulepszenia, a także monitorują wpływ produktu na środowisko po wprowadzeniu go na rynek. Oba procesy są iteracyjne, a projektanci mogą wracać do poprzednich etapów i wprowadzać zmiany w celu usprawnienia projektu. W przypadku ekoprojektowania projektanci dążą do stworzenia produktów przyjaznych dla środowiska i zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju, minimalizując wpływ na środowisko na każdym etapie cyklu życia produktu.

Głównym celem ekoprojektowania jest ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne już na etapie projektowania produktów czy planowania procesów produkcyjnych. Pozytywne efekty będą zauważalne zarówno w fazie produkcji, jak i w fazie użytkowania.

Hierarchia odzyskiwania wartości z odpadów wymusza na przedsiębiorstwach skoncentrowanie się na doskonaleniu środowiskowym produktu. Bardzo duży nacisk kładzie się na etap jego projektowania. Produkt powinien być tak zaprojektowany, by zminimalizować zużycie surowców, materiałów i energii podczas produkcji oraz ograniczyć negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne procesów wytwarzania, użytkowania wyrobu gotowego czy jego likwidacji. Pamiętać należy przy tym, aby dążyć do minimalizacji kosztów produkcji<sup>151</sup>. Takie podejście w literaturze nazywane jest projektowaniem dla środowiska (ang. *design for environment*), projektowaniem zielonym (ang. *green design*), ekoprojektowaniem (ang. *ecodesign*) lub też projektowaniem zorientowanym na recykling (ang. *design for recycling*).

W fazie projektowania produktu zostaje określone około 80% wszystkich wpływów na środowisko naturalne<sup>152</sup>. Działania w kierunku ochrony środowiska naturalnego obejmują poszczególne etapy projektowania oraz cały cykl życia produktu. Należy odpowiednio opracować technologię produkcji, aby była bezpieczna dla środowiska. Bardzo ważnym elementem jest dobór surowców i materiałów, w tym miejscu należy zwrócić uwagę na surowce odnawialne oraz nadające się do powtórnego zagospodarowania. Okres użytkowania produktu powinien być jak najdłuższy, a produkt w fazie użytkowania przyjazny środowisku<sup>153</sup>. Ekoprojektowanie pozwala na stworzenie produktu, który minimalizuje wpływ na środowisko, a jednocześnie jest efektywny i przystępny dla użytkowników. Projektowanie z myślą o ochronie środowiska może również przyczynić

---

<sup>151</sup> W. Nierzwicki, *Zarządzanie środowiskowe*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2006, s. 57.

<sup>152</sup> K. Schischke, M. Hagelüken, G. Steffenhagen, *Wprowadzenie do strategii ekoprojektowania. Dlaczego, co i jak?*, EcoDesign Awareness Raising Campaign for Electrical & Electronics SMEs, Poznań 2005, s. 77.

<sup>153</sup> T. Nitkiewicz, *Ekologiczna ocena...*, op. cit., s. 63.



się do zwiększenia zysków przedsiębiorstwa poprzez zmniejszenie kosztów produkcji i poprawę wizerunku marki.

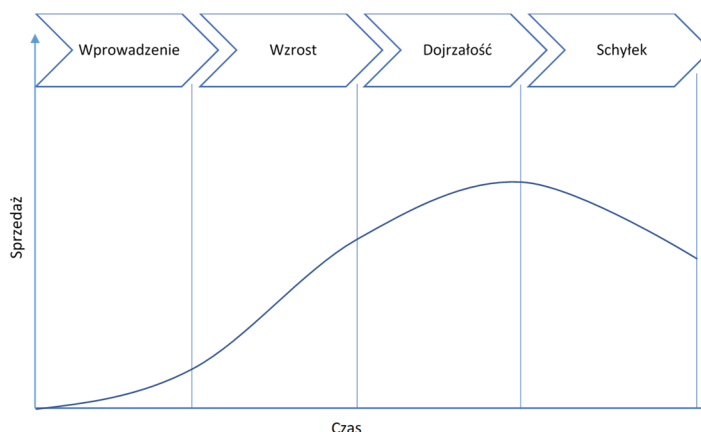
Cykl życia produktu to sekwencja etapów, które produkt przechodzi od wprowadzenia na rynek przez okres wzrostu sprzedaży i dojrzałości do schyłku i wycofania. T. Levitt opisywał cykl życia produktu jako proces, który przekłada się na zmiany w sprzedaży i zyskach produktu na przestrzeni czasu. Cykl ten składa się z pięciu etapów: wprowadzenia produktu na rynek, wzrostu sprzedaży, dojrzałości, spadku i wycofania produktu<sup>154</sup>. Każdy z tych etapów ma swoje unikalne cechy i wymaga odmiennych strategii marketingowych, aby osiągnąć sukces na danym etapie cyklu życia produktu. Etap wprowadzenia na rynek nowego produktu charakteryzuje się niską świadomością i zainteresowaniem klientów. Firma wprowadzająca produkt na rynek musi wtedy inwestować w kampanie marketingowe i reklamowe, aby zwiększyć świadomość marki oraz zainteresowanie klientów. Na tym etapie często występują wysokie koszty produkcji i promocji, co wpływa negatywnie na zyski firmy. Etap wzrostu charakteryzuje się dynamicznym wzrostem sprzedaży, zwiększającym się zainteresowaniem klientów i większą świadomością marki. Na tym etapie zyski zaczynają rosnąć, a koszty zmniejszać się dzięki wykorzystaniu ekonomii skali i wdrażaniu bardziej wydajnych procesów produkcyjnych. Etap dojrzałości charakteryzuje się stabilizacją sprzedaży i zysków. Konkurencja jest duża, a innowacje produktowe są niezbędne do utrzymania pozycji na rynku. Na tym etapie firmy mogą zwiększać zyski przez obniżanie kosztów produkcji, podnoszenie jakości produktu, zwiększanie udziału w rynku lub różnicowanie produktów. Etap schyłku charakteryzuje się spadkiem sprzedaży, zysków i akceptacji klientów. Na tym etapie konkurencja może zdominować rynek i zmniejszyć udział w nim firmy. Przedsiębiorstwo musi podejmować decyzje dotyczące dalszej strategii produktu, takie jak wycofanie go z rynku, rebranding lub zmiana strategii marketingowej. Etap wycofania jest końcowym etapem cyklu życia produktu. Przedsiębiorstwo decyduje się na całkowite wycofanie produktu z rynku. Powody takiej decyzji mogą być różne: brak opłacalności, przestarzałość produktu lub niskie zapotrzebowanie. Na tym etapie przedsiębiorstwo może sprzedać pozostałe zapasy produktu lub zastąpić go nowszą wersją. Cykl życia produktu przedstawiono na rysunku 2.3. Analiza cyklu życia produktu umożliwia ocenę całkowitego wpływu produktu na środowisko – od pozyskania surowców do likwidacji odpadów. Pozwala to na identyfikację głównych źródeł negatywnego wpływu na środowisko oraz wyznaczenie obszarów, w których można wprowadzić ulepszenia.

Ekoprojektowanie odnosi się zarówno do nowych koncepcji produktów, jak i wyrobów już istniejących na rynku, które wymagają udoskonalenia pod

---

<sup>154</sup> T. Levitt, *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review” 1965, 43, s. 81-94.

względem ekologicznym. W poszczególnych fazach cyklu życia produktu jego oddziaływanie na środowisko naturalne jest różne, dlatego należy analizować poszczególne etapy osobno.



**Rysunek 2.3. Cykl życia produktu**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: T. Levitt, *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review” 1965, 43, s. 81-94

Ekoprojektowanie może ulepszyć produkt we wszystkich fazach: produkcji, użytkowania oraz końca życia produktu. W pierwszej fazie należy skoncentrować się na minimalizacji materiałów wykorzystywanych do produkcji. Dodatkowo zastosowane materiały powinny być ekologiczne, a te, które są niekorzystne dla środowiska naturalnego, należy ograniczyć do minimum. W fazie użytkowania powinno się zwrócić uwagę na polepszenie sprawności energetycznej produktu. W ostatniej fazie – końca życia produktu – wszelkie działania należy ukierunkować na ulepszenie produktu pod kątem recyklingu<sup>155</sup>.

Jedną z metod ochrony środowiska naturalnego jest recykling. Głównym celem recyklingu jest zwracanie do obiegu lub powtórne użycie materiałów i surowców. Umożliwia to odzyskanie wartości ekonomicznych zawartych w zwracanych produktach. Ponadto pozwala on na zmniejszenie kosztów związanych z przechowywaniem odpadów niepodlegających odzyskowi<sup>156</sup>. Fundamentalnym warunkiem osiągnięcia zamierzonych celów jest odpowiednia segregacja odpadów, ponieważ materiały wysortowane z odpadów mogą być odpowiednio przetwarzane<sup>157</sup>. Proces recyklingu jest złożony z wielu operacji, tj. zbiórki,

<sup>155</sup> M. Stachura, A. Karwasz, *Ekoprojektowanie w praktyce*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją” 2007, 5, s. 59.

<sup>156</sup> M.J. Realf, J.C. Ammons, D. Newton, *Strategic Design...*, op. cit., s. 991-996.

<sup>157</sup> K. Witkowski, *Aspekt logistyki zwrotów i recyklingu tworzyw sztucznych*, [w:] *Ekonomiczne, społeczne i środowiskowe uwarunkowania logistyki*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 2015, 383, s. 311.

segregacji, transportu oraz przetwarzania odpadów<sup>158</sup>. Recykling można realizować w niemalże każdej fazie cyklu życia produktu, np. w fazie produkcji, eksploatacji czy likwidacji. W pierwszej fazie zapobiega się nadmiernej eksploatacji surowców naturalnych, redukuje powstawanie odpadów produkcyjnych, jak również ogranicza zużycie energii w procesach produkcyjnych. W kolejnej fazie dokładane są wszelkie starania, by wydłużyć okres eksploatacji produktu (np. wymiana zużytych części) oraz zminimalizować zapotrzebowanie na energię w trakcie jego użytkowania. W ostatniej fazie głównym celem jest odzyskiwanie surowców wtórnych ze zużytych produktów tak, by ponownie włączyć je do procesu produkcyjnego. Poza tym maksymalizuje się odzysk materiałów, z których w wyniku przekształcania termicznego pozyskuje się energię. Procesy występujące w tej fazie to: zbieranie produktów zużytych oraz ich demontaż, selekcja i przetwarzanie odzyskanych materiałów, zagospodarowanie odzyskanych materiałów nadających się do użytku oraz unieszkodliwienie odpadów nieużytecznych<sup>159</sup>. Projektanci powinni tak dobrać materiały do produkcji danego wyrobu, aby po wycofaniu z obiegu można byłoby go poddać recyklingowi. Poza tym produkty powinny być tak zaprojektowane, aby do ich demontażu nie były potrzebne specjalne narzędzia czy skomplikowane i czasochłonne operacje. W celu redukcji kosztów recyklingu należy zaprojektować produkt w taki sposób, by przy jak najmniejszym nakładzie pracy pozyskać jak najwięcej części lub surowców wtórnych.

Ekoprojektowanie sprzyja przedsiębiorstwu w kreowaniu pozytywnego wizerunku. Działania na rzecz ochrony środowiska, takie jak projektowanie produktów przyjaznych dla środowiska, minimalizacja zużycia zasobów naturalnych i redukcja emisji zanieczyszczeń, mogą przyczynić się do zmniejszenia negatywnego wpływu przedsiębiorstwa na środowisko i zwiększenia jego społecznej odpowiedzialności. Klienci, którzy coraz bardziej zwracają uwagę na kwestie związane ze środowiskiem naturalnym, chętniej kupują produkty i korzystają z usług firm, które wykazują pozytywne podejście do ochrony środowiska. Konsumenci, coraz bardziej świadomi problemów ochrony środowiska naturalnego, wybierają produkty opatrzone ekoetykietami. Ekoprojektowanie może prowadzić do zmniejszenia kosztów i zwiększenia efektywności przedsiębiorstwa poprzez zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych i energii oraz zmniejszenie kosztów likwidacji odpadów. Dlatego przedsiębiorstwa, które stosują ekoprojektowanie, mogą zyskać przewagę konkurencyjną, zwiększyć lojalność klientów i poprawić swoją reputację, co w efekcie może przyczynić się do zwiększenia zysków i długoterminowego sukcesu.

---

<sup>158</sup> M. Kuczyńska-Chałada, *Logistyka powtórnego zagospodarowania...*, op. cit., s. 897.

<sup>159</sup> T. Nowakowski (red.), *Systemy logistyczne*, op. cit., s. 37-40.

## Rozdział 3

# Wybrane metody sztucznej inteligencji w prognozowaniu

### 3.1. Systemy rozmyte – podstawowe pojęcia

Coraz częściej w systemach wspomagających zarządzanie wykorzystywane są narzędzia sztucznej inteligencji. Metody sztucznej inteligencji dają m.in. możliwość analizy danych pochodzących z obserwacji eksperymentu czy z wiedzy eksperckiej. Inteligencja obliczeniowa jest zestawem algorytmów inspirowanych naturą do rozwiązywania problemów, w których tradycyjne modele matematyczne byłyby bezużyteczne ze względu na złożoność zjawiska. Ponadto często te dane nie są dokładne i kompletne. W niniejszej monografii przedstawiono tylko wybrane metody sztucznej inteligencji, które wykorzystano w badaniach.

Podstawowym założeniem w teorii zbiorów jest przynależność lub nieprzynależność danego elementu do zbioru. Jednak bardzo często założenie to staje się ograniczeniem, szczególnie w sytuacjach, gdy mamy do czynienia z pojęciami opisanymi w sposób nieprecyzyjny lub wieloznaczny. Często klasyczna teoria zbiorów oraz logika dwuwartościowa nie jest w stanie opisać tych pojęć. Dlatego powstały zbiory rozmyte, które określają stopień przynależności do danego zbioru, tym samym rozmywają granicę zbioru. Pojawia się wtedy problem z określeniem stopnia przynależności elementu do zbioru, czyli liczby z przedziału  $[0, 1]$ .

Przy użyciu zbiorów rozmytych możemy określić nieprecyzyjne i wieloznaczne pojęcia, takie jak np. duży strumień odpadów, duże zanieczyszczenie czy małe zużycie, które funkcjonują w języku naturalnym. Przed zdefiniowaniem zbioru rozmytego należy określić tzw. obszar rozważań, który jest zbiorem nierozmytym. W zależności od wielkości obszaru rozważań jedne z wartości będą uznawane za „duże”, a inne za „małe”. Obszar rozważań jest to przestrzeń lub zbiór (nierozmyty), oznacza się go literą  $X$ . Przykładowo dla ilości odpadów w przypadku pojęcia „mała ilość odpadów” inna wielkość będzie uznawana za dużą, jeżeli obszarem rozważań będzie przedział  $[0; 100]$  kg, a inna jeśli rozważania będą dotyczyły przedziału  $[120; 160]$  kg.

W 1965 roku L.A. Zadeh wprowadził pojęcie zbioru rozmytego (ang. *fuzzy set*), które jest podstawą teorii zbiorów rozmytych. W zbiorze rozmytym nie istnieje ostra granica pomiędzy elementami, które należą do tego zbioru, a tymi,

które do niego nie należą<sup>160</sup>. Zbiorem rozmytym  $A$  w przestrzeni  $X$  (niepustej), nazywamy zbiór par:

$$A = \{(x, \mu(x)) ; x \in X\}, \quad (3.1)$$

w którym:

$$\mu_A: X \rightarrow [0;1] \quad (3.2)$$

jest funkcją przynależności zbioru rozmytego  $A$ . Funkcja ta każdemu elementowi  $x \in X$  przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego. Jeżeli  $\mu_A(x) = 1$ , to element  $x$  w pełni należy do zbioru rozmytego  $A$ ,  $\mu_A(x) = 0$  oznacza brak przynależności elementu  $x$  do zbioru rozmytego  $A$ , jeśli  $0 < \mu_A(x) < 1$  to element  $x$  częściowo przynależy do zbioru  $A$ <sup>161</sup>.

Zazwyczaj używa się zbiorów rozmytych normalnych, gdyż są one łatwiejsze do interpretacji lingwistycznej dla człowieka. W przypadku zbiorów nieznormalizowanych dochodzi dodatkowy parametr w postaci wysokości zbioru, co sprawia trudności interpretacyjne.

Wraz z rozwojem logiki rozmytej powstały systemy rozmyte, które są narzędziem obliczeniowym opartym na zbiorach i regułach rozmytych oraz wnioskowaniu rozmytym. Składają się one z trzech komponentów: bazy reguł (wiedzy), bazy zbiorów rozmytych oraz mechanizmu wnioskowania, który na podstawie danych faktów oraz bazy wiedzy generuje wnioski w postaci zbiorów rozmytych. Zazwyczaj pożądane jest, aby wyjście systemu było w postaci ostrej (nierozmytej), co pociąga za sobą konieczność użycia mechanizmu wyostrzania przekształcającego rozmytą informację wyjściową w jej najlepszą ostrą reprezentację. Schemat systemu rozmytego przedstawiony jest na rysunku 3.1. Mając wejściowe dane rozmyte lub ostre, na podstawie reguł rozmytych mapuje on przestrzeń wejściową w wyjściową. Każda z reguł odzwierciedla lokalne mapowanie w obszarze określonym przez jej zbiory rozmyte. Wszystkie zbiory rozmyte w części następnikowej reguł (wyjściowe) są agregowane za pomocą jednej z metod uwzględniających poziomy aktywacji reguł rozmytych. Na wyjściu agregatora otrzymujemy zbiór rozmyty, który może być wykorzystany jako wyjście z systemu lub przekształcony przez blok wyostrzania na liczbę rzeczywistą.

Systemy rozmyte wykorzystują czytelne dla człowieka reguły JEŻELI ... TO, których parametry, czyli zmienne lingwistyczne, opisane są zbiorami rozmytymi. Pierwsza część reguły rozmytej to poprzednik, a część TO... to następnik.

---

<sup>160</sup> E. Czołga, W. Pedrycz, *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*, PWN, Warszawa 1985, s. 10-11.

<sup>161</sup> L. Rutkowski, *Metody i techniki sztucznej inteligencji, Inteligencja obliczeniowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005, s. 52-53.

Zbiory rozmyte w regułach mogą mieć interpretację lingwistyczną typu np. mało, dużo, wysokie itp. Bazę reguł, nazywaną czasami modelem lingwistycznym, stanowi zbiór  $N$  rozmytych reguł  $R^{(k)}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , mających postać

$$R^{(k)}: \text{JEŻELI } (x_1 \text{ jest } A_1^k \text{ I } x_2 \text{ jest } A_2^k \text{ I } \dots \text{ I } x_n \text{ jest } A_n^k) \text{ TO } (y \text{ jest } B^k) \quad (3.3)$$

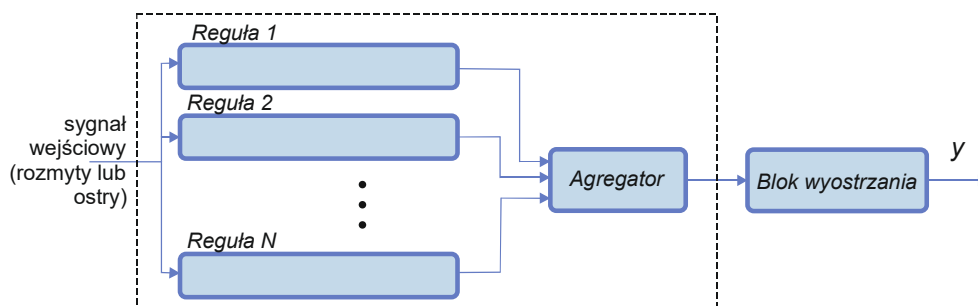
gdzie:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – zmienne wejściowe systemu rozmytego,

$A_i^k$  – zbiór rozmyty zdefiniowany w domenie liczb rzeczywistych dla  $i$ -tego wejścia i reguły o numerze  $k$ ,

$B^k$  – wyjściowy zbiór rozmyty,

$y$  – zmienna wyjściowa systemu rozmytego.



**Rysunek 3.1. Schemat blokowy systemu rozmytego**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: R. Babuška, *Fuzzy Modeling for Control*, Springer, Dordrecht 1998, s. 9-46

Pierwszym, najczęściej używanym systemem rozmytym jest system typu Mamdani, mający zbiory rozmyte w części przesłankowej oraz następnikowej reguły. Poziom aktywacji reguły jest obliczany za pomocą operatora minimum lub operatora iloczyn ze wszystkich zbiorów rozmytych w części poprzednikowej reguły. Następnie zbiory w częściach następnikowych reguł są agregowane przez operator maksimum. Wynikowy zbiór rozmyty wyostrzany jest najczęściej przez obliczenie środka ciężkości powstałego zbioru wyjściowego<sup>162</sup>.

Innym popularnym modelem jest system typu Takagi-Sugeno, który posiada zbiory rozmyte w części poprzednikowej, a funkcję wejść w części następnikowej. Wyjście systemu Takagi-Sugeno obliczane jest jako średnia wartości tych funkcji ważona przez poziomy aktywacji poszczególnych reguł rozmytych<sup>163</sup>.

<sup>162</sup> E.H. Mamdani, S. Assilian, *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller*, „International Journal of Man-Machine Studies” 1975, 7, 1, s. 1-13.

<sup>163</sup> T. Takagi, M. Sugeno, *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control*, „IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics” 1985, 15, 1, s. 116-132.

Systemy rozmyte ogólnie służą do mapowania przestrzeni wejściowej w wyjściową za pomocą łatwych do zrozumienia reguł rozmytych. W przypadku podziału obiektów na różne kategorie mamy do czynienia z zadaniem klasyfikacji<sup>164</sup>. Obiekty opisane są cechami (atrybutami) będącymi najczęściej liczbami rzeczywistymi. Natomiast dane wyjściowe w zbiorze treningowym są etykietami klas.

Innym zadaniem, które mogą rozwiązywać systemy rozmyte, jest zadanie regresji, gdzie zmienne wyjściowe w zbiorze treningowym przyjmują wartości ciągłe. Szczególnym przypadkiem regresji jest predykcja, w której na podstawie przeszłych wartości danej zmiennej przewidujemy przyszłe wartości, które ta zmienna przyjmie.

Systemy rozmyte są dobrą alternatywą dla konwencjonalnych metod sterowania, klasyfikacji i predykcji, gdzie najczęściej musimy znać model matematyczny danego zjawiska. W systemach rozmytych możemy stosować dowolną liczbę reguł rozmytych, w których zawarta jest wiedza eksperta lub wielu ekspertów, możemy również wyznaczać parametry tych reguł wprost z danych.

## 3.2. Wprowadzenie do sztucznych sieci neuronowych

Sieci neuronowe to struktury matematyczne oraz ich programowe lub sprzętowe modele. Inspiracją do ich budowy były naturalne neurony połączone synapsami oraz cały układ nerwowy, a w szczególności jego centralny punkt – mózg. Sztuczne sieci neuronowe mogą być używane w szerokim spektrum zagadnień związanych z przetwarzaniem danych, na przykład w klasyfikacji wzorców, predykcji, odszumianiu, kompresji i rozpoznawaniu obrazu, tekstu i dźwięku lub automatyce<sup>165</sup>.

Sieci neuronowe mają zdolność przetwarzania danych niekompletnych oraz podawania wyników przybliżonych. Umożliwiają szybkie i skuteczne przetwarzanie dużych ilości danych. Są odporne na błędy i uszkodzenia<sup>166</sup>.

Podstawowym elementem sieci neuronowej jest neuron. W sieciach neuronowych każdy neuron otrzymuje sygnały wejściowe z innych neuronów lub z zewnętrznych źródeł, przetwarza je za pomocą wewnętrznych parametrów i generuje sygnał wyjściowy. W sieciach neuronowych neurony są zorganizowane w warstwy, gdzie każda warstwa składa się z jednego lub wielu neuronów. W warstwie wejściowej neurony otrzymują dane wejściowe, a w warstwie wyjściowej

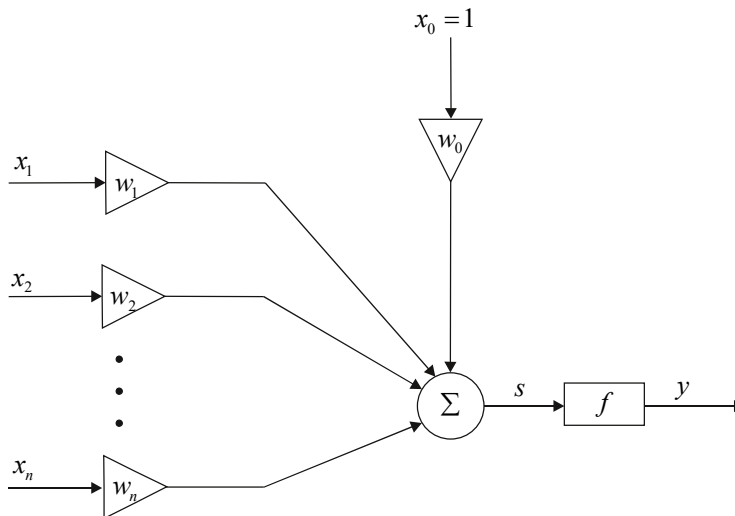
---

<sup>164</sup> J. Trajer, A. Paszek, S. Iwan, *Zarządzanie wiedzą*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2012, s. 255.

<sup>165</sup> Y. Bengio, A. Courville, I. Goodfellow, *Deep Learning. Systemy uczące się*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, s. 24-25.

<sup>166</sup> L. Kiełtyka, *Inteligentne systemy prognozowania. Zasady funkcjonowania. Zastosowania*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000, s. 41.

neurony generują wynik końcowy. W warstwach ukrytych neurony przetwarzają informacje z poprzednich warstw. Znaczenie neuronów w sieciach neuronowych polega na ich zdolności do uczenia się i dostosowywania wewnętrznych parametrów w celu generowania optymalnych wyników. Podczas uczenia sieć neuronowa jest trenowana za pomocą zestawu danych treningowych, które są wykorzystywane do modyfikacji wewnętrznych parametrów neuronów. W ten sposób sieć neuronowa jest w stanie nauczyć się złożonych wzorców w danych wejściowych i generować odpowiednie wyniki wyjściowe.



**Rysunek 3.2. Model neuronu**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L. Rutkowski, *Metody i techniki sztucznej inteligencji. Inteligencja obliczeniowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005, s. 161

Na rysunku 3.2 przedstawiono model neuronu, gdzie wprowadzono następujące oznaczenia:

- $n$  – liczba wejść w neuronie,
- $x_1, \dots, x_n$  – sygnały wejściowe,
- $w_0, \dots, w_n$  – wagi synaptyczne,
- $y$  – wartość wyjściowa neuronu,
- $w_0$  – wartość progowa,
- $f$  – funkcja aktywacji.

Działanie neuronu można opisać za pomocą wzoru:

$$y = f(s), \tag{3.4}$$

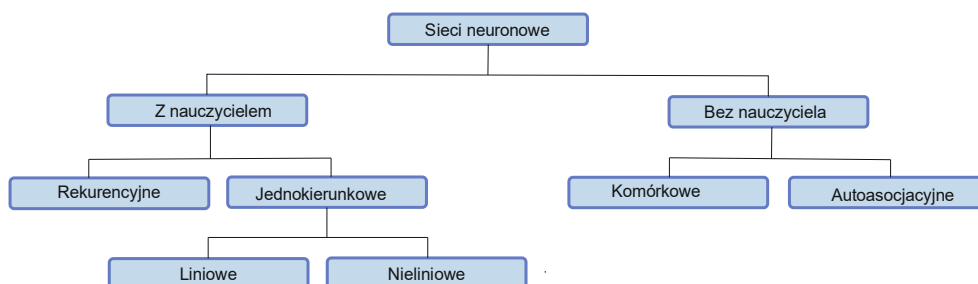


gdzie:

$$s = \sum_{i=0}^n x_i w_i. \quad (3.5)$$

Sygnały wejściowe  $x_0, \dots, x_n$  zostają pomnożone przez odpowiadające im wagi  $w_0, \dots, w_n$ . Otrzymane wartości są sumowane, w wyniku czego powstaje sygnał  $s$ . Następnie sygnał ten jest poddawany działaniu funkcji aktywacji, która zazwyczaj jest nieliniowa<sup>167</sup>.

Istnieje wiele modeli sieci neuronowych. Podziału sieci neuronowych można dokonać, biorąc pod uwagę następujące czynniki: metoda uczenia, kierunek propagacji sygnałów w sieci, typ funkcji przejścia, rodzaj danych wejściowych oraz sposób połączeń między neuronami. Opierając się na tych czynnikach, przedstawiono klasyfikację sieci neuronowych omówionych w niniejszej dysertacji, co przedstawiono na rysunku 3.3.



**Rysunek 3.3. Klasyfikacja sieci neuronowych**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L. Rutkowski, *Metody i techniki...*, op. cit., s. 159-227

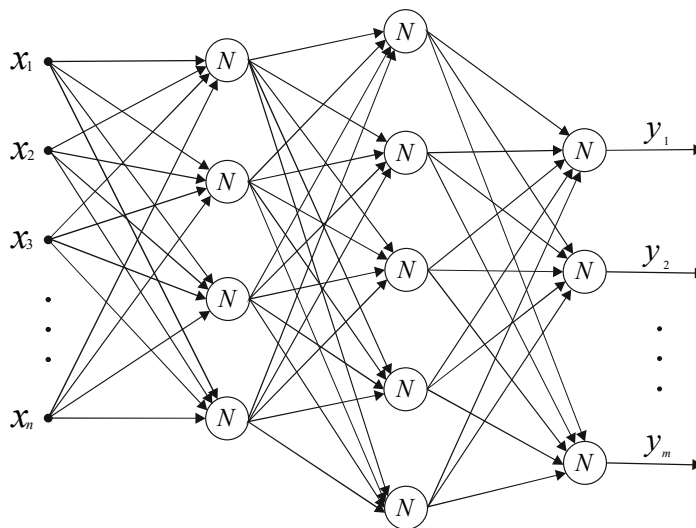
Sieci neuronowe składają się z połączonych ze sobą neuronów. W zależności od sposobu tych połączeń wyróżnia się trzy typy sieci neuronowych: jednokierunkowe, sieci ze sprzężeniem zwrotnym oraz sieci komórkowe. W sieciach jednokierunkowych przepływ sygnałów odbywa się zawsze w jednym kierunku – od wejścia do wyjścia. Wyjścia neuronów jednej warstwy są wejściami neuronów kolejnej warstwy. Odmianą sieci jednokierunkowych są sieci splotowe<sup>168</sup>, w których neurony (zwane filtrami) są wykorzystywane w wielu miejscach danych. Dzięki temu zmniejsza się znacząco wielkość sieci potrzebna do odwzorowania danego problemu.

<sup>167</sup> L. Rutkowski, *Metody i techniki...*, op. cit., s. 160.

<sup>168</sup> C.M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York 2006, s. 267.

W sieciach ze sprzężeniem zwrotnym, zwanych również rekurencyjnymi, część sygnałów wyjściowych jest jednocześnie sygnałami wejściowymi. W sieciach tego typu pobudzenie sieci przez sygnał wejściowy powoduje wielokrotną aktywację części lub wszystkich neuronów podczas procesu tzw. relaksacji sieci. Dlatego w celu sprawdzenia poprawności działania sieci należy dodać warunek stabilności. Pobudzona sieć musi osiągnąć stan stabilny, gdzie wartości wyjściowe neuronów pozostaną stałe, proces ten powinien odbyć się w skończonym czasie. Natomiast w sieciach komórkowych każdy neuron jest połączony z neuronami z nim sąsiadującymi<sup>169</sup>. Najpopularniejszą architekturą sieci rekurencyjnych są sieci typu pamięć długotrwała i krótkotrwała (LSTM).

Najczęściej wykorzystywaną architekturą neuronową zarówno w modelach badawczych, jak i komercyjnych są sieci perceptronowe. Są to sieci jednokierunkowe, gdzie neurony zgrupowane są w co najmniej dwóch warstwach. Pierwsza warstwa nazywana jest warstwą wejściową, a ostatnia wyjściową. Pomiędzy tymi warstwami może występować jedna lub więcej warstw ukrytych. Sygnały są przekazywane od warstwy wejściowej do wyjściowej bez sprzężeń zwrotnych do warstw poprzednich<sup>170</sup>. Schemat trójwarstwowej sieci neuronowej przedstawia rysunek 3.4. Jako  $x_1, \dots, x_n$  oznaczono sygnały wejściowe, a  $y_1, \dots, y_m$  jako sygnały wyjściowe.



**Rysunek 3.4. Schemat trójwarstwowej sieci neuronowej**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L. Rutkowski, *Metody i techniki...*, op. cit., s. 180

<sup>169</sup> A. Kwiatkowska, *Systemy wspomaganie decyzji. Jak korzystać z wiedzy i informacji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 109-110.

<sup>170</sup> J. Zieliński, *Inteligentne systemy w zarządzaniu. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000, s. 146.

Liczba neuronów w poszczególnych warstwach ma istotne znaczenie w działaniu sieci. Zbyt duża liczba neuronów powoduje wydłużenie procesu uczenia. Poza tym jeśli liczba próbek uczących w odniesieniu do rozmiaru sieci jest niewielka, to sieć może zostać „przeuczona”, a co za tym idzie stracić możliwość uogólniania wiedzy. W takim przypadku sieć nauczy się ciągu uczącego „na pamięć” i prawdopodobnie będzie prawidłowo odwzorowywać tylko próbki, które zostały w nim zawarte. Dlatego po nauczaniu sieci należy sprawdzić poprawność jej działania. W tym celu wykorzystuje się ciąg testowy składający się z próbek, które nie były obecne w procesie uczenia sieci. Dopiero po przetestowaniu można stwierdzić, czy sieć została odpowiednio nauczona i działa poprawnie.

Wyróżnia się dwie metody uczenia sieci neuronowych: uczenie nadzorowane (ang. *supervised learning*) i uczenie nienadzorowane (ang. *unsupervised learning*). Uczenie sieci polega na wymuszeniu określonej reakcji sieci neuronowej na podane sygnały wejściowe. Dlatego bardzo ważnym momentem badań jest odpowiedni dobór metody uczenia. Uczenie nadzorowane, zwane również uczeniem z nauczycielem, polega na takiej modyfikacji wag, by sygnały wyjściowe były jak najbardziej zbliżone do wartości pożądaných. Dane treningowe zawierają zarówno grupy sygnałów wejściowych, jak i propozycje reakcji na te sygnały. Specjalnym przypadkiem uczenia nadzorowanego jest uczenie ze wzmocnieniem, gdzie podczas uczenia sieci nie są podawane dokładne wartości pożądaných sygnałów wyjściowych, tylko informacje, czy reaguje ona poprawnie. Uczenie nienadzorowane, zwane uczeniem bez nauczyciela, polega na samodzielnym przeanalizowaniu zależności w zbiorze testowym przez sieć neuronową. W trakcie uczenia sieć nie otrzymuje żadnych informacji dotyczących pożądaných reakcji. Dane treningowe zawierają tylko zbiór sygnałów wejściowych. Sieci o takim działaniu nazywane są samoorganizującymi się lub autoasocjacyjnymi<sup>171</sup>.

Sieci neuronowe potrafią na podstawie danych nauczyć się szerokiego spektrum problemów. Są lepsze od tradycyjnej architektury komputerowej w zadaniach, które ludzie wykonują w sposób naturalny, np. rozpoznawanie obrazu lub uogólnianie wiedzy. Postęp w rozwoju techniki komputerowej oraz algorytmów uczenia sieci pociąga za sobą stałe zwiększanie stopnia skomplikowania zadań rozwiązywanych przez sieci neuronowe. Powstają również nowe architektury, np. wspomniane konwolucyjne sieci neuronowe, potrafiące m.in. klasyfikować tysiące klas zdjęć lub przetwarzać tekst.

---

<sup>171</sup> J. Zieliński, *Inteligentne systemy...*, op. cit., s. 142.

### 3.3. Charakterystyka sieci neuronowo-rozmytych

Systemy neuronowo-rozmyte są połączeniem sieci neuronowych i logiki rozmytej. Łączą dzięki temu zrozumiałe dla człowieka wnioskowanie w formie reguł JEŻELI – TO (ang. *IF – THEN*), z możliwością uczenia nadzorowanego, co ma miejsce w sieciach neuronowych. Eliminowane są w ten sposób pewne wady obu technik, czyli brak interpretowalności w przypadku sieci neuronowych (tzw. czarna skrzynka) i możliwości uczenia w przypadku systemów rozmytych. Ogólnie mówiąc, systemy neuronowo-rozmyte odpowiadają różnego rodzaju systemom rozmytym, ale tworzenie modelu rozmytego na podstawie danych uczących zazwyczaj odbywa się algorytmem pochodzącym ze świata sieci neuronowych. Warstwy w tych systemach są już inne niż w sieciach neuronowych i odzwierciedlają bloki i operacje istniejące w systemach rozmytych, czyli zmienne wejściowe, zbiory rozmyte w poprzednikach reguł, zbiory rozmyte w następnikach reguł, wnioskowanie i wyostrzenie. Widać stąd, że nie jest to już jednorodna struktura złożona z podobnych neuronów, jak w przypadku tradycyjnych sztucznych sieci neuronowych. Poza możliwością uczenia na podstawie danych, w porównaniu do sieci neuronowych, uzyskujemy możliwość inicjalizacji systemu i interpretacji wiedzy, gdyż cały system neuronowo-rozmyty może być zawsze interpretowany jako czytelne reguły.

Podobnie jak w klasycznych systemach rozmytych systemy rozmyto-neuronowe aproksymują  $n$ -wymiarową funkcję, zdefiniowaną częściowo przez dane uczące. Każda reguła rozmyta opisuje lokalne zachowanie się tej funkcji w przestrzeni zmiennych wejściowych. Często problem doboru funkcji przynależności i reguł rozmytych jest zadaniem trudnym, a nawet niewykonalnym dla człowieka przy wielowymiarowych problemach. Dzięki algorytmom uczenia z danych zaczerpniętym ze świata sieci neuronowych, systemy neuronowo-rozmyte mogą być tworzone dla dowolnie skomplikowanych problemów.

Jedną z popularnych architektur jest ANFIS<sup>172</sup> (ang. *Adaptive Network based Fuzzy Inference System*) będący implementacją systemu Takagi-Sugeno, składający się z pięciu warstw. Pierwsza warstwa zawiera funkcje przynależności wejściowych zbiorów rozmytych. Druga warstwa realizuje operacje T-normy w celu wyliczenia poziomu aktywacji reguł. Trzecia warstwa normalizuje poziomy aktywacji reguł, dzięki czemu ostatnia warstwa może jedynie sumować wszystkie wartości wyjściowe reguł w celu wyliczenia ostatecznej wartości wyjściowej systemu. Warstwa 4 obejmuje funkcje liniowe wartości wejściowych. W czasie uczenia systemu ANFIS za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędu

---

<sup>172</sup> J.-S.R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, Upper Saddle River 1996, s. 336.

zmieniane są parametry wejściowych funkcji przynależności oraz współczynniki w funkcjach liniowych w warstwie czwartej.

Najpopularniejszym modelem rozmyto-neuronowym jest omówiony poprzednio system Mamdaniego, w którym poprzedniki i następniki reguł łączone są za pomocą operacji minimum lub iloczyn. W badaniach zaprezentowanych w następnych rozdziałach zastosowano taki model, ale ze zbiorami typu singleton w części następnikowej reguł:

$$R^{(k)}: \text{JEŻELI } (x_1 \text{ jest } A_1^k \text{ I } x_2 \text{ jest } A_2^k \text{ I } \dots \text{ I } x_n \text{ jest } A_n^k) \text{ TO } (y \text{ jest } B^k) \quad (3.6)$$

Powyższa reguła ma postać taką, jak w ogólnym systemie rozmytym, ale wyjściowy zbiór rozmyty  $B^k$  jest zbiorem typu singleton, czyli ma wartość przynależności jeden tylko w jednym miejscu przestrzeni, a w pozostałych zero.

Ponieważ w systemie jest  $N$  reguł, po operacji wnioskowania otrzymujemy również  $N$  zbiorów rozmytych typu singleton (liczb rzeczywistych). Wyostrzenie jest dokonywane za pomocą ważonej średniej arytmetycznej według wzoru (3.7):

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N B^k \cdot \tau^k}{\sum_{k=1}^N \tau^k}. \quad (3.7)$$

gdzie  $\tau^k$  to współczynnik aktywacji reguły określony jako iloczyn stopni przynależności poszczególnych zbiorów w części poprzednikowej reguły:

$$\tau^k = \prod_{i=1}^n \left( \mu_{A_i^k}(x_i) \right). \quad (3.8)$$

Iloczyn ten realizuje logiczną operację „I” w regułach rozmytych. Wszystkie reguły biorą udział w procesie wyznaczania wartości wyjściowej w sposób proporcjonalny do swojej aktywacji, czyli do stopnia dopasowania się do aktualnych danych wejściowych. Po podstawieniu powyższego wzoru do (3.7), otrzymujemy:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N B^k \cdot \prod_{i=1}^n \left( \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^n \left( \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}. \quad (3.9)$$

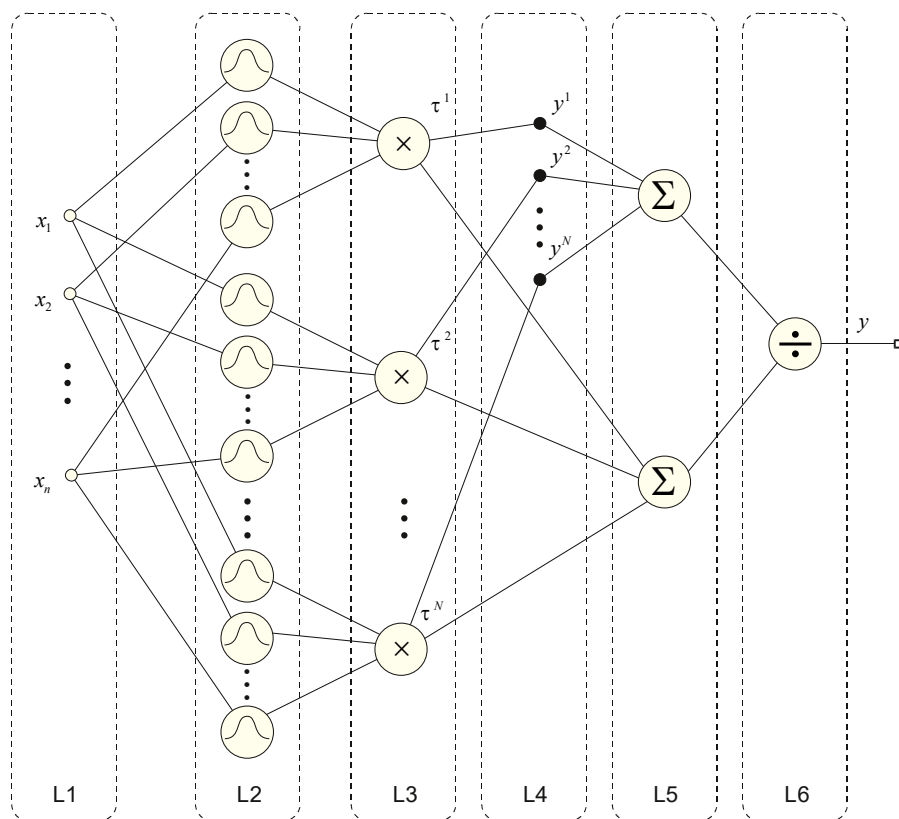
W badaniach założono, że wejściowe zbiory rozmyte (zmienne lingwistyczne) są opisane gaussowskimi funkcjami przynależności, to znaczy:

$$\mu_{A_i^k}(x_i) = \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right], \quad (3.10)$$

gdzie  $\bar{x}_i^k$  oraz  $\sigma_i^k$  to odpowiednio środek i szerokość funkcji przynależności dla wejścia o numerze  $i$  oraz w regule o numerze  $k$ . Z powyższych zależności otrzymujemy postać systemu neuronowo-rozmytego z wnioskowaniem typu iloczyn:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N B^k \cdot \prod_{i=1}^n \left( \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^n \left( \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)} \quad (3.11)$$

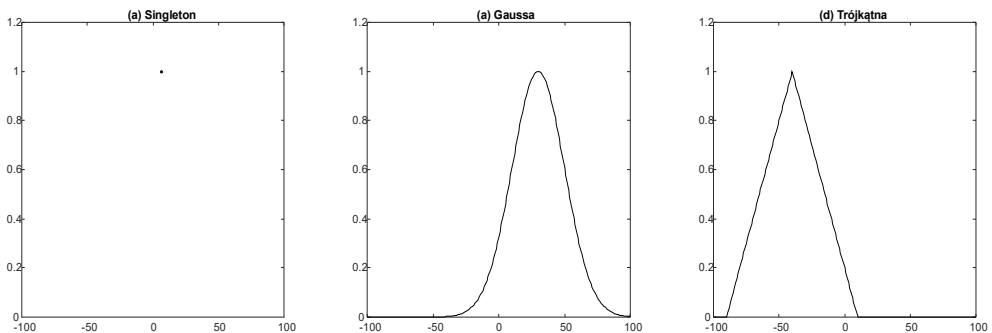
Na rysunku 4.8 przedstawiono schemat blokowy struktury odzwierciedlającej powyższą zależność. Jak widać, jest ona podobna do wielowarstwowej sieci neuronowej i do jej uczenia można stosować np. algorytm wstecznej propagacji błędów. Algorytm uczenia dostosowuje parametry wejściowych i wyjściowych funkcji przynależności, aby najlepiej dopasować system do danych uczących.



**Rysunek 3.5. Schemat systemu neuronowo-rozmytego**

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L. Rutkowski, *Metody i techniki...*, op. cit., s. 318-382

System neuronowo-rozmyty przedstawiony na rysunku 3.5 posiada  $n$  wejść oraz  $N$  reguł, funkcje przynależności w poprzednikach reguł (warstwa L2) mnożone są w warstwie L3, aby wyliczyć stopnie aktywacji poszczególnych reguł. W warstwie L4 stopnie aktywacji reguł mnożone są przez wyjściowe zbiory rozmyte typu singleton. Warstwy L5 i L6 realizują operację wyostrzania jako średnią ważoną. Wiedza zawarta w postaci reguł rozmytych może być zebrana przez ekspertów lub w procesie uczenia z danych. Najczęściej stosowanymi funkcjami przynależności są funkcje Gaussa i trójkątna w części poprzednikowej reguł, a funkcja typu singleton w części następnikowej reguł. Zostały one przedstawione na rysunku 3.6.



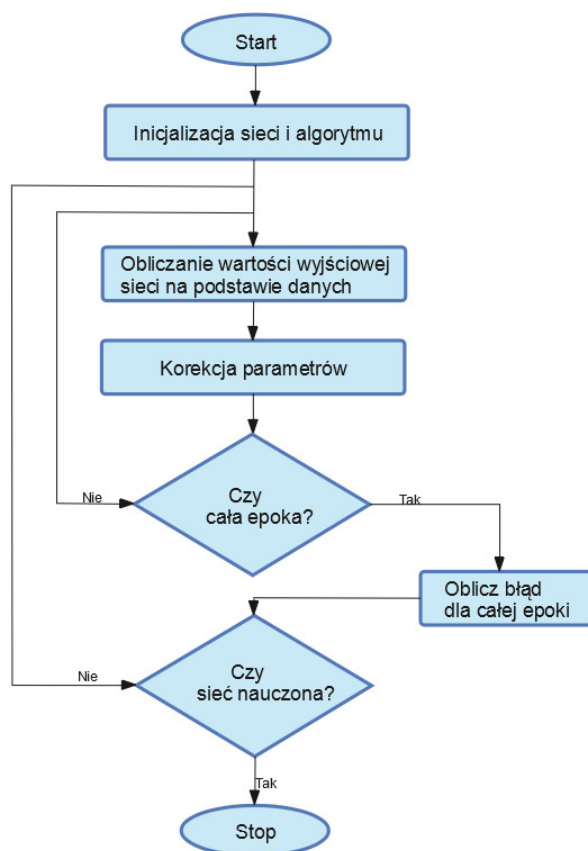
**Rysunek 3.6. Przykłady funkcji przynależności zbiorów rozmytych stosowane w systemach neuronowo-rozmytych**

Źródło: opracowanie własne

Uczenie może być realizowane np. przez algorytm wstecznej propagacji błędów, który to algorytm na podstawie gradientu błędów między sygnałem wzorcowym a wyjściowym zmienia w sposób iteracyjny wartości parametrów funkcji przynależności przy kolejnych prezentacjach danych uczących. Przebieg procesu uczenia sieci neuronowo-rozmytych przedstawiono za pomocą algorytmu w postaci schematu blokowego na rysunku 3.7.

Zmiana parametrów systemów odbywa się na podstawie gradientu błędów pomiędzy wartością wzorcową a wartością wyjściową systemu neuronowo-rozmytego.

Systemy rozmyto-neuronowe dzielą z sieciami neuronowymi zalety w postaci możliwości uczenia z danych oraz modelowania systemów bez znajomości ich dokładnego modelu matematycznego. W stosunku do sieci neuronowych mają przewagę związaną z interpretacją wiedzy w postaci reguł rozmytych, przez co jest możliwe użycie wiedzy eksperckiej lub ekstrakcja wiedzy po uczeniu z danych.



**Rysunek 3.7. Schemat blokowy algorytmu uczenia sieci neuronowo-rozmytych**

Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie systemów neuronowo-rozmytych w logistyce zwrotnej umożliwia przewidywanie wielkości strumieni odpadowych. Dzięki temu przedsiębiorstwo może skuteczniej zarządzać odpadami. Logika rozmyta pozwala na zastosowanie wiedzy eksperckiej w postaci reguł. Ponadto po procesie uczenia z danych możliwy jest również odwrotny proces, czyli ekstrakcja wiedzy z systemu uczonego z danych. Odpady z produkcji są przekazywane do organizacji odzysku i utylizacji odpadów.



## Rozdział 4

# Prognozowanie wielkości strumieni odpadowych w przedsiębiorstwie produkcyjnym

### 4.1. Proces pozyskiwania i przygotowania danych uczących

Coraz częściej systemy wspomagające zarządzanie są zaopatrzone w moduły obsługujące procesy związane z logistyką zwrotną, jednak nie jest to jeszcze standardem. Warto byłoby włączyć obszar logistyki zwrotnej do faz projektowych opracowywanych systemów. Ułatwiłoby to podejmowanie decyzji o wprowadzeniu rozwiązań z zakresu logistyki zwrotnej już na etapie wdrażania tych systemów w przedsiębiorstwie.

Brak odpowiednich systemów informatycznych i technologicznych spowalnia rozwój logistyki zwrotnej<sup>173</sup>. Złożoność przepływów informacyjnych związanych z logistyką zwrotną wymusza zastosowanie właściwych narzędzi, które pozwolą zoptymalizować przepływy oraz usprawnią zarządzanie procesami dotyczącymi zwrotów<sup>174</sup>. Poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie logistyki zwrotnej spowodowane jest również wzrostem liczby przepisów prawnych, które obligują przedsiębiorstwa do przyjęcia z powrotem wadliwych produktów oraz recyklingu odpadów<sup>175</sup>.

Środowisko naturalne bezustannie podlega negatywnym wpływom procesów produkcyjnych. Monitoring gospodarki odpadami jest istotnym narzędziem wspomagającym politykę ekologiczną państwa<sup>176</sup>. Dlatego też bardzo ważną kwestią w tym zakresie jest rozwój narzędzi informatycznych wspomagających zarządzanie logistyką zwrotną.

Jednym ze sposobów kontroli gospodarki odpadami jest monitorowanie przepływu odpadów, dzięki czemu można wykryć różnego rodzaju błędy związane z ich wytwarzaniem i gromadzeniem. Wczesne wykrycie nieprawidłowości

---

<sup>173</sup> A. Mesjasz-Lech, *Efektywność ekonomiczna...*, op. cit., s. 53.

<sup>174</sup> J. Grabara, *System gospodarowania odpadami elektronicznymi jako element logistyki zwrotnej*, [w:] R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2009, s. 371.

<sup>175</sup> J. Grabara, *Logistyka odwrotna nowym wyzwaniem dla systemów informacyjnych*, [w:] *Nowoczesne technologie informacyjne w zarządzaniu*, „Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu” 2003, 986, s. 461.

<sup>176</sup> A. Kowalski, M. Żygadło, *Planowanie, zarządzanie...*, op. cit., s. 198.

umożliwia szybsze i skuteczniejsze reagowanie, w konsekwencji zminimalizowanie negatywnych skutków oddziaływania na środowisko naturalne. Poza tym przedsiębiorstwa, według Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach, zobowiązane są do prowadzenia ewidencji wytworzonych odpadów. By usprawnić działania związane z logistyką zwrótną, potrzebne są nowe funkcje obsługujące ten obszar logistyki w informatycznych systemach zarządzania.

Metody uczenia maszynowego są wykorzystywane w rozwiązywaniu różnych problemów. Jednak każdy problem wymaga odpowiedniego dostosowania danej metody. Do zadanego problemu należy wybrać np. odpowiednią topologię sieci, dobrać liczbę neuronów w warstwach oraz liczbę warstw sieci. Następnie trzeba przygotować zbiór uczący i testujący. Daną sieć należy najpierw nauczyć, a później zweryfikować poprawność jej działania.

Do przewidywania wielkości strumieni odpadów zdecydowano się użyć systemów rozmyto-neuronowych, które pozwalają na tworzenie systemu na podstawie danych oraz na użycie wiedzy w formie czytelnych reguł dla człowieka. Ponadto możliwa jest ekstrakcja wiedzy z systemu nauczonego z danych do postaci reguł rozmytych. Dane zostały udostępnione przez jedno z typowych przedsiębiorstw produkcyjnych.

Katalog odpadów według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów dzieli odpady w zależności od źródeł ich powstawania na dwadzieścia grup. Każdy rodzaj odpadu ma przypisany sześcioliterowy kod. W badanym przedsiębiorstwie produkcyjnym występują odpady z następujących grup:

- 080111 – Odpady farb i lakierów,
- 130110 – Mineralne oleje hydrauliczne,
- 150102 – Opakowania z tworzyw sztucznych,
- 150110 – Opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych,
- 150202 – Tkaniny do wycierania,
- 150203 – Ubrania ochronne,
- 160213 – Zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy.

Wielkość poszczególnych odpadów w latach 2009-2019 w badanym przedsiębiorstwie przedstawia tabela 4.1. Wartości przedstawione w tabelach 4.1 oraz 4.2, poczynając od kolumny 2, zawierają dane dla poszczególnych grup odpadów, oznaczonych właściwymi kodami zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów.

Na podstawie danych z tabeli 4.1 określono udział procentowy danego odpadu w całości. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 4.2. Analizując dane z tabeli 4.2, można zauważyć, że w całości odpadów dominuje ich pewna grupa.

**Tabela 4.1. Suma odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019. Masa odpadów została przedstawiona w kg**

Rok	080111	130110	150102	150110	150202	150203	160213	Suma
2009	69	1520	1165	85	173	10	7	3029
2010	58	2650	975	84	144	100	7	4018
2011	71	2980	1755	87	195	10	9	5107
2012	74	1850	1130	82	194	49	10	3389
2013	72	3880	1280	84	215	47	8	5586
2014	83	3940	1400	80	208	49	9	5769
2015	79	1720	1340	77	219	46	10	3491
2016	84	860	1160	65	210	41	10	2430
2017	79	550	1210	74	219	40	10	2182
2018	500	2500	1150	405	60	153	19	4787
2019	500	1100	940	980	65	118	10	3713
<b>Suma końcowa</b>	<b>1669</b>	<b>23 550</b>	<b>13 505</b>	<b>2103</b>	<b>1902</b>	<b>663</b>	<b>109</b>	<b>43 501</b>

Źródło: opracowanie własne

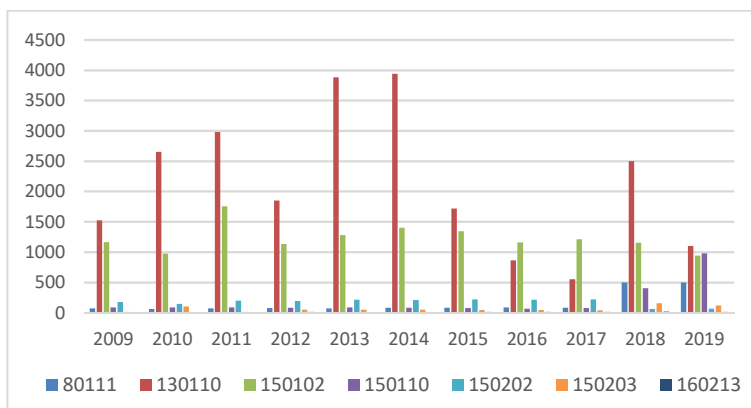
**Tabela 4.2. Udział procentowy odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019 w całości w poszczególnych latach**

Rok	080111	130110	150102	150110	150202	150203	160213
2009	2,28%	50,18%	38,46%	2,81%	5,71%	0,33%	0,23%
2010	1,44%	65,95%	24,27%	2,09%	3,58%	2,49%	0,17%
2011	1,39%	58,35%	34,36%	1,70%	3,82%	0,20%	0,18%
2012	2,18%	54,59%	33,34%	2,42%	5,72%	1,45%	0,30%
2013	1,29%	69,46%	22,91%	1,50%	3,85%	0,84%	0,14%
2014	1,44%	68,30%	24,27%	1,39%	3,61%	0,85%	0,16%
2015	2,26%	49,27%	38,38%	2,21%	6,27%	1,32%	0,29%
2016	3,46%	35,39%	47,74%	2,67%	8,64%	1,69%	0,41%
2017	3,62%	25,21%	55,45%	3,39%	10,04%	1,83%	0,46%
2018	10,44%	52,22%	24,02%	8,46%	1,25%	3,20%	0,40%
2019	13,47%	29,63%	25,32%	26,39%	1,75%	3,18%	0,27%

Źródło: opracowanie własne

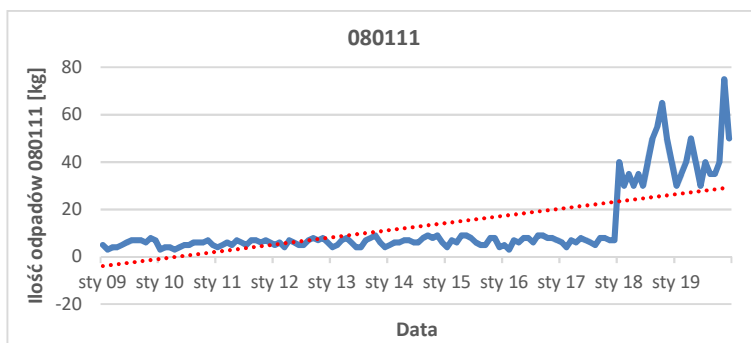
Po posortowaniu podanych wartości według ilości odpadów w całości w poszczególnych latach można zaobserwować, iż największa ilość odpadów należy

do następujących grup: mineralne oleje hydrauliczne (kod: 130110) – 23 550 kg oraz opakowania z tworzyw sztucznych (kod: 150102) – 13 505 kg. Jednak należy zwrócić uwagę na drastyczny wzrost w ostatnich latach odpadów z grupy: opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych (kod: 150110) oraz odpady farb i lakierów (kod: 080111), co przedstawia rysunek 4.1. Dlatego zdecydowano się poddać analizie wszystkie grupy odpadów występujące w badanym przedsiębiorstwie.



**Rysunek 4.1. Wykres przedstawiający ilość odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019. Masa odpadów została przedstawiona w kg**

Źródło: opracowanie własne



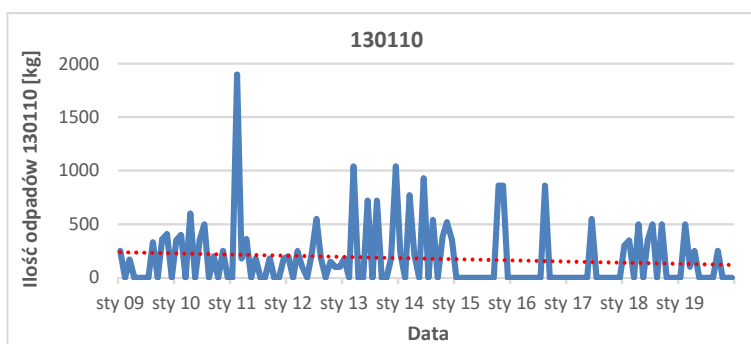
**Rysunek 4.2. Miesięczny wykres produkcji odpadów powstałych z farb i lakierów (kod 080111)**

Źródło: opracowanie własne

Na poszczególnych wykresach przedstawiono ilości generowanych odpadów w układzie miesięcznym: odpady farb i lakierów – 080111 (rys. 4.2), mineralne

oleje hydrauliczne – 130110 (rys. 4.3), opakowania z tworzyw sztucznych – 150102 (rys. 4.4), opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych – 150110 (rys. 4.5), tkaniny do wycierania – 150202 (rys. 4.6), ubrania ochronne – 150203 (rys. 4.7), zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy – 160213 (rys. 4.8). Czerwoną linią zaznaczono linię trendu dla poszczególnych grup odpadów.

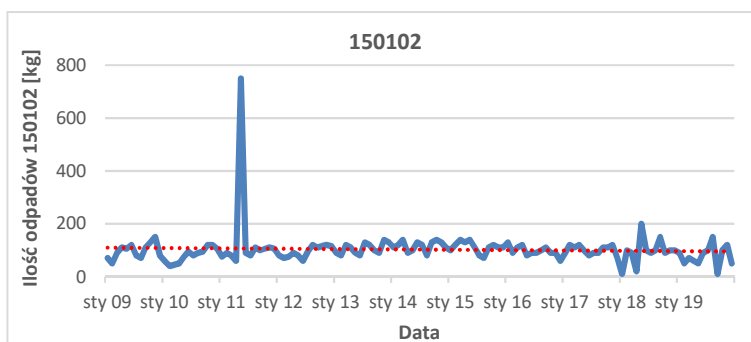
Analizując wykres przedstawiający produkcję odpadów powstałych z farb i lakierów (rys. 4.2), można zauważyć ich gwałtowny wzrost w dwóch ostatnich badanych latach.



**Rysunek 4.3. Miesięczny wykres produkcji odpadów mineralnych olejów hydraulicznych (kod 130110)**

Źródło: opracowanie własne

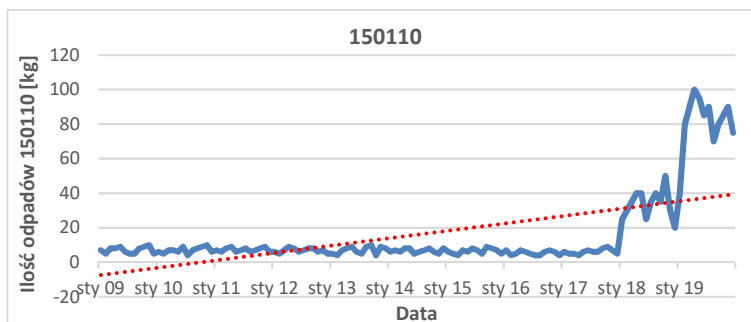
Dane dotyczące odpadów mineralnych olejów hydraulicznych (rys. 4.3) nie wykazują wyraźnego trendu. Jednak pojawia się pojedyncza wartość (1900 kg) w styczniu 2011 roku odbiegająca znacznie od normy. Może ona mieć negatywny wpływ na proces uczenia. Nagły wzrost ilości odpadów może również wynikać ze zdarzenia losowego w badanym przedsiębiorstwie lub z błędu ludzkiego.



**Rysunek 4.4. Miesięczny wykres produkcji odpadów powstałych z opakowań z tworzyw sztucznych (kod 150102)**

Źródło: opracowanie własne

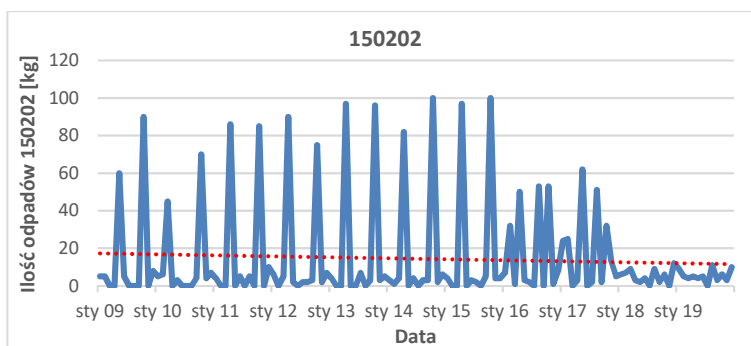
Na wykresie przedstawiającym ilość generowanych odpadów powstałych z opakowań z tworzyw sztucznych (rys. 4.4) można również zauważyć pojedynczy skok wartości, który miał miejsce w maju 2011 roku, gdzie ilość wytwarzanych odpadów wynosiła 750 kg.



**Rysunek 4.5. Miesięczny wykres produkcji opakowań zawierających pozostałości substancji niebezpiecznych (kod 150110)**

Źródło: opracowanie własne

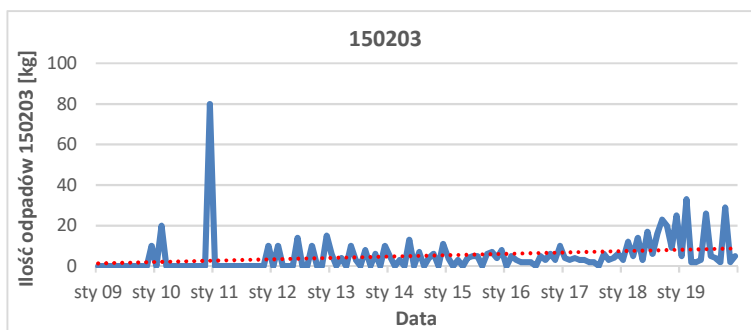
Wykres przedstawiający ilość odpadów z grupy opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych (rys. 4.5) (podobnie jak przy odpadach z grupy odpadów powstałych z farb i lakierów) ma tendencję rosnącą w dwóch ostatnich badanych latach.



**Rysunek 4.6. Miesięczny wykres produkcji tkanin do wycierania (kod 150202)**

Źródło: opracowanie własne

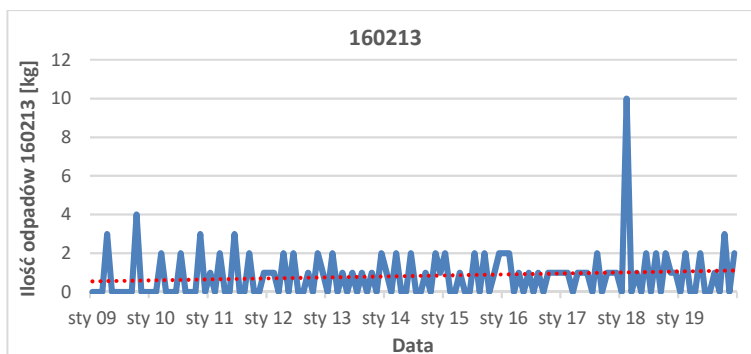
Dane dotyczące generowania odpadów powstałych z tkanin do wycierania (rys. 4.6) nie pokazują żadnych widocznych zależności. Jedyne można zaobserwować tendencję spadkową ilości wytwarzanych odpadów w czterech ostatnich badanych latach.



**Rysunek 4.7. Miesięczny wykres produkcji odpadów zawierających ubrania ochronne (kod 150203)**

Źródło: opracowanie własne

W latach 2018-2019 można zauważyć wzrost ilości odpadów z grupy ubrania ochronne (rys. 4.7). Poza tym w grudniu 2010 roku nastąpił pojedynczy skok ilości odpadów, wynoszący 80 kg.



**Rysunek 4.8. Miesięczny wykres produkcji odpadów: zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy (kod 160213)**

Źródło: opracowanie własne

Dane odnoszące się do ilości odpadów: zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy (rys. 4.8) nie wykazują wyraźnego trendu. W lutym 2018 roku pojawia się pojedyncza wartość wynosząca 10 kg, która znacząco odbiega od normy, a co za tym idzie może mieć negatywny wpływ na wyniki badań.

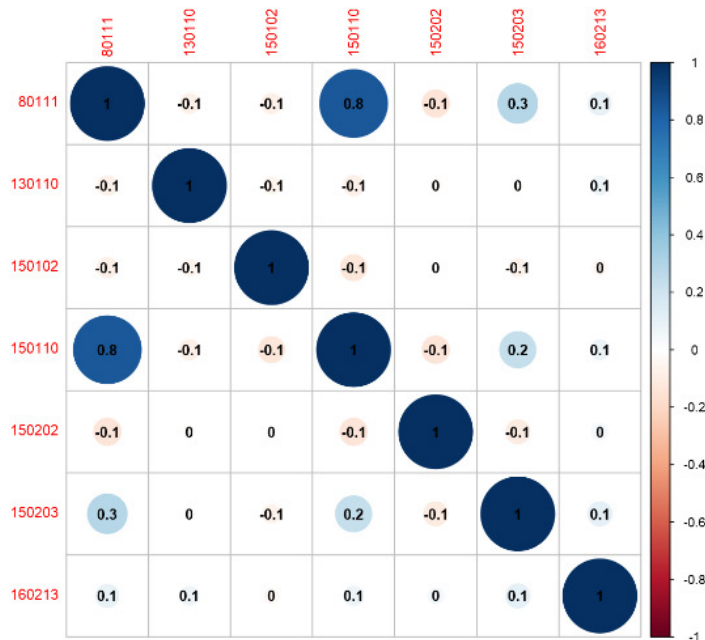
Charakter procesu produkcyjnego w badanym przedsiębiorstwie powoduje, że między wytwarzanymi odpadami wyróżnionych grup zachodzą określone zależności. Wskazanie istnienia powiązań między różnymi kategoriami jest jednym z podstawowych celów badań ekonomicznych. Korelacja jest miarą powiązania występującego między zmiennymi, którą określamy na podstawie

współczynnika korelacji<sup>177</sup>. Grupy odpadów poddano analizie korelacji, aby ustalić, w jakim stopniu dane są ze sobą powiązane. W tym celu obliczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla danych grup odpadów. Współczynnik ten przyjmuje wartość z przedziału  $\langle -1; 1 \rangle$ , gdzie zero oznacza całkowity brak korelacji, 1 oznacza zupełną korelację dodatnią, a -1 zupełną korelację ujemną. Dodatnia korelacja oznacza, że wraz ze wzrostem wartości pierwszej zmiennej rosną również wartości drugiej zmiennej. W przypadku korelacji ujemnej wzrost wartości pierwszej zmiennej powoduje spadek wartości drugiej zmiennej. Współczynnik korelacji Pearsona wyraża wzór:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

w którym:

- $x_i$  – jednostkowa  $i$ -ta wartość zmiennej  $x$ ,
- $y_i$  – jednostkowa  $i$ -ta wartość zmiennej  $y$ ,
- $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna dla zmiennej  $x$ ,
- $\bar{y}$  – średnia arytmetyczna dla zmiennej  $y$ ,
- $n$  – liczba obserwacji.



**Rysunek 4.9. Macierz korelacji poszczególnych odpadów**

Źródło: opracowanie własne

<sup>177</sup> M. Szajt, *Przestrzeń w badaniach ekonomicznych*, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania, Częstochowa 2014, s. 43.



Uzyskane wyniki z zakresu analizy zależności korelacyjnej zostały przedstawione za pomocą macierzy korelacji (rys. 4.9). Najwyższy współczynnik korelacji (równy 0,8) występuje między odpadami z grup: odpady farb i lakierów oraz opakowania zawierające pozostałości substancji niebezpiecznych. Jednak na potrzeby badań nie jest on wystarczająco istotny, aby przeprowadzić prognozę dla dwóch grup odpadów jednocześnie. Pozostałe współczynniki korelacji wskazują, że dane nie są ze sobą skorelowane, dlatego wszystkie grupy odpadów będą prognozowane osobno.

## 4.2. Uczenie sieci neuronowo-rozmytych

Prognozowanie oraz umiejętność dokonywania oceny przyszłych zdarzeń odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu przedsiębiorstw. Niepewność przyszłości oraz odstęp czasu od momentu podjęcia decyzji aż do jej wyniku powodują konieczność znalezienia odpowiednich metod prognostycznych. Dzięki trafnym i dokładnym prognozom podejmowanie decyzji staje się znacznie łatwiejsze, tym samym łatwiejsze staje się zarządzanie przedsiębiorstwem. Prognozy powinny być podstawą tworzenia planów działań przedsiębiorstwa. Wciąż poszukuje się nowych metod prognozowania, gdzie uzyskane wyniki będą obarczone jak najmniejszym błędem, a metody te będą proste i tanie w użytkowaniu.

Podczas procesu przewidywania oraz planowania przyszłości można wyróżnić takie zadania, jak: opracowywanie wstępnej strategii rozwoju na bazie danych prognostycznych, określenie czynników mających wpływ na rozwój przedsiębiorstwa, ustalenie celu przewidywanego rozwoju, analiza ekonomiczna rozwoju oraz wybór najlepszych rozwiązań, opracowanie jak najlepszego sposobu realizacji planowanych działań, określenie środków finansowych oraz rzeczowych niezbędnych do realizacji zadań, opracowanie planu realizacji zamierzonych celów<sup>178</sup>. Umiejętność prognozowania poprawia również działania z zakresu logistyki zwrotnej. Dzięki danym prognostycznym strumieni odpadowych możliwe jest sprawniejsze zarządzanie odpadami w przedsiębiorstwie, a także planowanie działań mających na celu usprawnienie ich przepływu w systemie logistycznym przedsiębiorstwa. Zatem zastosowanie metod prognostycznych, pozwalających na prognozowanie strumieni odpadowych obarczone niewielkim błędem, będzie przekładać się na skuteczność i sprawność zarządzania przedsiębiorstwem, a w konsekwencji jego efektywność. Zastosowanie narzędzi pozwalających na określenie przyszłego kształtowania się wielkości strumieni materiałów odpadowych pozwoli bowiem na prawidłowe zaangażowanie

---

<sup>178</sup> A. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *Programowanie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2007, s. 59.

posiadanych zasobów w obsługę tych strumieni i uzyskanie tym samym właściwej relacji nakłady – efekty.

Eksperymenty dla badanego przedsiębiorstwa wykonano w programie Matlab, który jest środowiskiem obliczeniowym pozwalającym na manipulowanie macierzami, tworzenie wykresów funkcji i danych, interfejsów użytkownika oraz implementację algorytmów we własnym języku programowania. Do tworzenia systemów rozmytych użyto funkcji z biblioteki Fuzzy Logic Toolbox, która pozwala na budowanie rozmytych systemów wnioskujących poprzez definiowanie zbiorów oraz reguł rozmytych, określanie parametrów systemów przez uczenie na podstawie danych oraz testowanie systemu. Wygenerowany system rozmyty można używać jako funkcje systemu Matlab lub wyeksportować jego parametry w celu użycia w zewnętrznym środowisku.

Zbiory danych pochodzące z przedsiębiorstwa zostały przystosowane do uczenia systemów rozmyto-neuronowych przez przesunięcie danych o kolejną jednostkę czasu (np. miesiący). Przykładowe polecenie tworzące zbiór danych składający się z czterech kolumn (wartości z kolejnych miesięcy – trzy wejścia do systemu i jedno wyjście ze wzorcową wartością prognozowaną) ma postać następującą:

```
for t = 4:129,  
    zbior_ucz(t-3,:) = [d(t-3) d(t-2) d(t-1) d(t)];  
end
```

gdzie  $d$  to zbiór składający się z liczb w jednej kolumnie, będących kolejnymi miesięcznymi wartościami produkcji.

Uczenie za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędu polegało na prezentacji danych uczących i zmianie parametrów systemu, aby minimalizować błąd średniokwadratowy na wyjściu systemu. Uczenie systemu na podstawie danych zostało przeprowadzone w kierunku minimalizacji błędu średniokwadratowego (ang. *root-mean-square error*, RMSE), który jest zdefiniowany następująco:

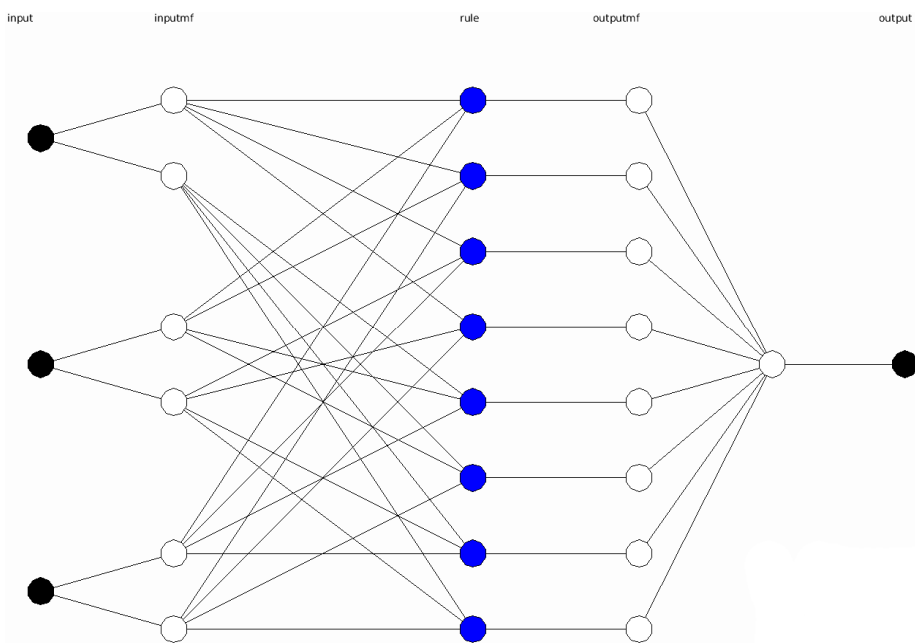
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.2)$$

gdzie  $y_i$  to wartość wzorcowa o numerze  $i$ ,  $\hat{y}_i$  to wartość prognozowana, a  $n$  to liczba wektorów w zbiorze treningowym. W przypadku systemu Matlab można go wyliczyć poleceniem:

```
RMSE = sqrt(mean((dane(:,4) - wyjscie_systemu).^2)),
```

gdzie `dane` to (w tym przypadku) czterokolumnowa tablica przechowująca zbiór treningowy, a `wyjscie_systemu` to tablica z wartościami prognozowanymi przez system. Jedna, pełna prezentacja zbioru danych uczących nazywana jest epoką. Wykresy błędu uczenia prezentowane są dla kolejnych epok.

Eksperymenty wykonano dla systemów rozmyto-neuronowych z gaussowskimi wejściowymi funkcjami przynależności oraz wyjściowymi zbiorami typu singleton (liczba rzeczywista). Przykład takiej struktury dla trzech wejść (input), trzema zbiorami rozmytymi (inputmf) na wejście oraz wynikającymi z tego 27 regułami i wyjściowymi parametrami (outputmf) przedstawiono na rysunku 4.10.



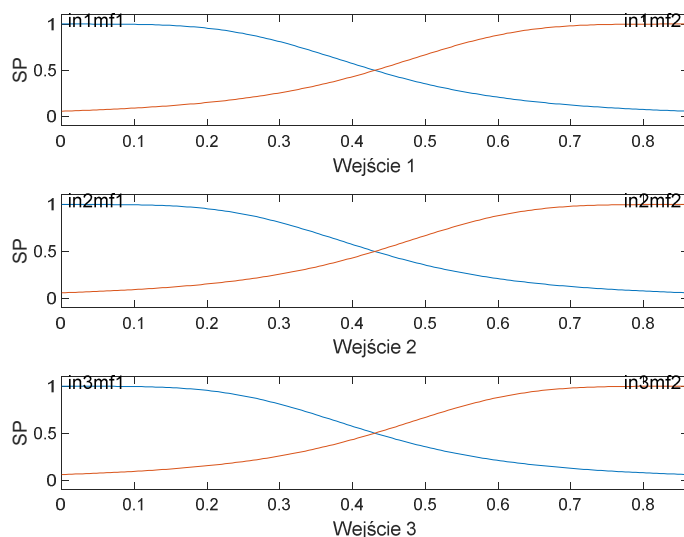
**Rysunek 4.10. Przykład struktury rozmyto-neuronowej z trzema wejściami i jednym wyjściem**

Źródło: opracowanie własne

Początkowe systemy rozmyte zostały wygenerowane poleceniem `genfis1`. Dla trzech funkcji przynależności na wejście polecenie to ma postać:

```
fis3wej3 = genfis1(dane_treningowe, 3),
```

a dla trzech wejść postać funkcji przynależności przedstawiono na rysunku 4.11.



**Rysunek 4.11. Przykład początkowych funkcji przynależności dla struktury rozmyto-neuronowej z trzema wejściami, jednym wyjściem i trzema funkcjami na wejście**

Źródło: opracowanie własne

W przypadku trzech wejść do systemu i trzech zbiorów rozmytych na każde wejście przestrzeń wejściową opisuje 27 reguł rozmytych:

1. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf1)
2. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf2)
3. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf3)
4. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf4)
5. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf5)
6. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf6)
7. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf7)
8. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf8)
9. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf9)
10. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf10)

11. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf11)
12. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf12)
13. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf13)
14. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf14)
15. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf15)
16. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf16)
17. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf17)
18. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf18)
19. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf19)
20. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf20)
21. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf21)
22. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf22)
23. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf23)
24. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf24)
25. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf25)
26. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf26)
27. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf27)

Parametry zbiorów (położenie i szerokość) będą zmieniane w czasie uczenia z danych. Uczenie przeprowadzono za pomocą funkcji `anfis`:

```
[sysroz2, error] = anfis(dane, sysroz2, 5000, []),
```

gdzie `sysroz2` to system neuronowo-rozmyty, na bazie którego będzie stworzony `sysroz2` poprzez uczenie przez 5000 epok, a błąd dla kolejnych epok

będzie zapisywany w tablicy `error`. Po nauczeniu sieci neuronowej odpowiednim ciągiem uczącym sprawdzono poprawność jej działania.

Po procesie uczenia systemy rozmyte zostały przetestowane za pomocą funkcji `evalfis`:

```
anfis_wyjście = evalfis(dane(:,1:3), sysrozmyty),
```

gdzie `sysrozmyty` to nauczony system, który podlega ocenie, a wartości wyjściowe systemu dla kolejnych zestawów danych wejściowych zapisywane są do tablicy `anfis_wyjście`. Na tej podstawie wygenerowane zostały wykresy przedstawiające działanie systemów w porównaniu do rzeczywistych danych oraz obliczono błąd średniokwadratowy RMSE dla całego zbioru uczącego. Reguły w nauczonym systemie odczytano poleceniem:

```
showrule(sysrozm2)
```

Parametry wyjściowe reguł uzyskano za pomocą pętli:

```
for t = 1:27,  
    outMFsOP(t,:) = sysrozm2.output.mf(t).params;  
end
```

W dalszej części podrozdziału przedstawiono wyniki badań dla systemów rozmyto-neuronowych o trzech wejściach i trzech zbiorach rozmytych na jedno wejście. Zbiory uczące zostały znormalizowane do przedziału (0,1) za pomocą funkcji:

```
daneN = mat2gray(dane) .
```

Normalizacja danych dawała lepsze rezultaty (mniejszy błąd) w czasie uczenia.

#### 4.2.1. Systemy rozmyte z dwiema funkcjami na wejście

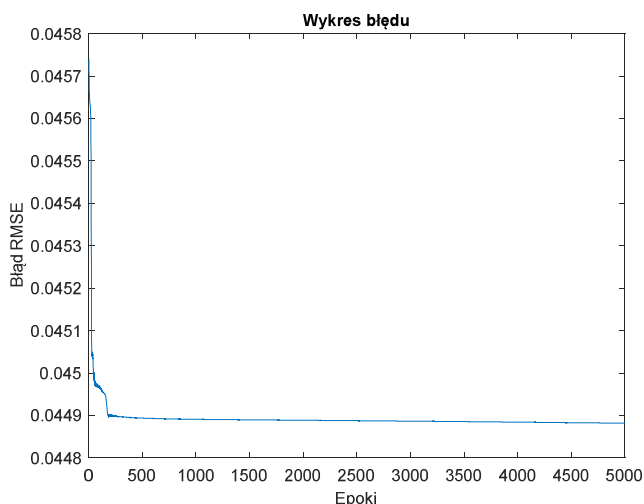
W tym podrozdziale zostaną zaprezentowane badania związane z uczeniem systemów rozmytych o trzech wejściach i dwóch funkcjach przynależności na każde z wejść. Ogólna postać reguł wygląda następująco:

1. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf1)
2. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf2)

3. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf3)
4. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf4)
5. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf5)
6. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf6)
7. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf7)
8. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf8)

#### 4.2.1.1. Przewidywanie zużycia odpadów nr 080111

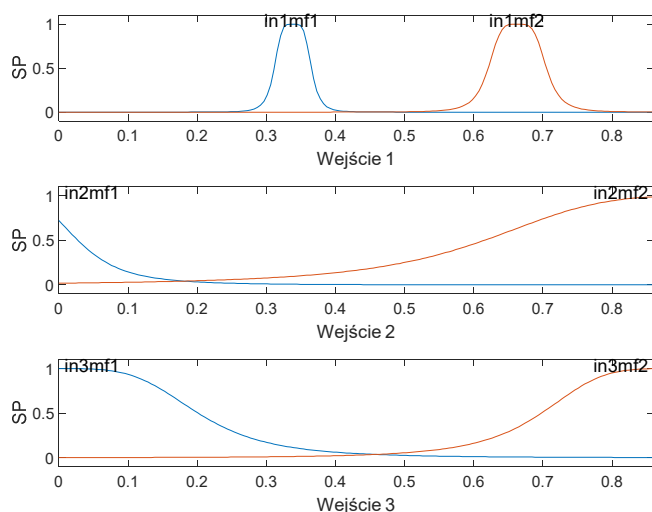
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0449. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.12. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.12. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

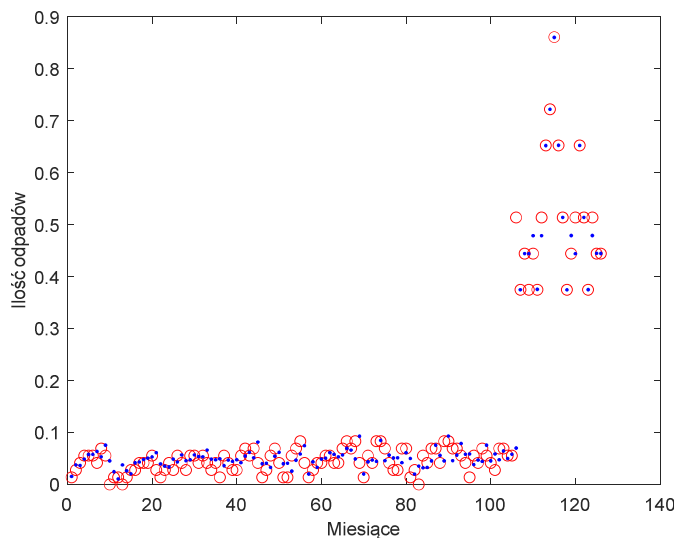
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.13. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących. SP oznacza stopień przynależności.



**Rysunek 4.13. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.14. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.14. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa



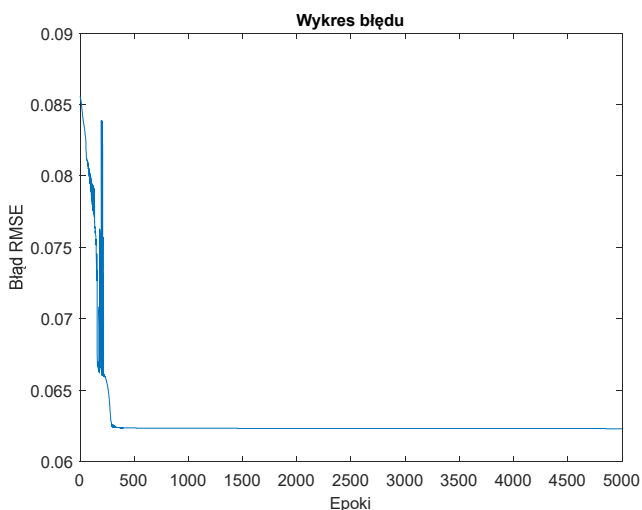
oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.13.

Po procesie uczenia reguły i ich parametry przechowują „wiedzę” zawartą w systemie. Wiedza ta została stworzona w procesie uczenia na podstawie danych numerycznych. Może ona być analizowana lub rozszerzana o nowe reguły przez ekspertów w danej dziedzinie.

#### 4.2.1.2. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150102

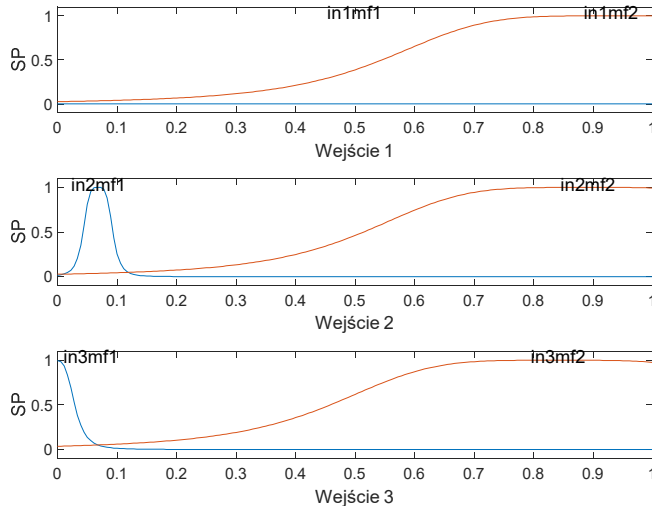
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0623. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.15. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.15. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

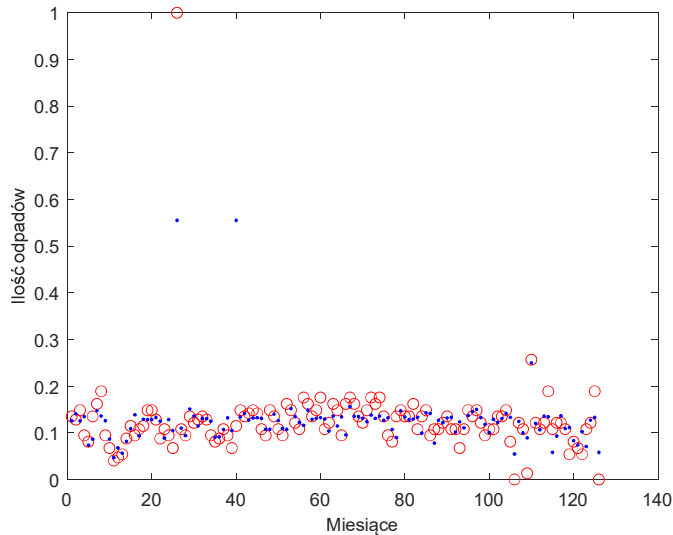
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.16. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących. SP oznacza stopień przynależności.



**Rysunek 4.16. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.17. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

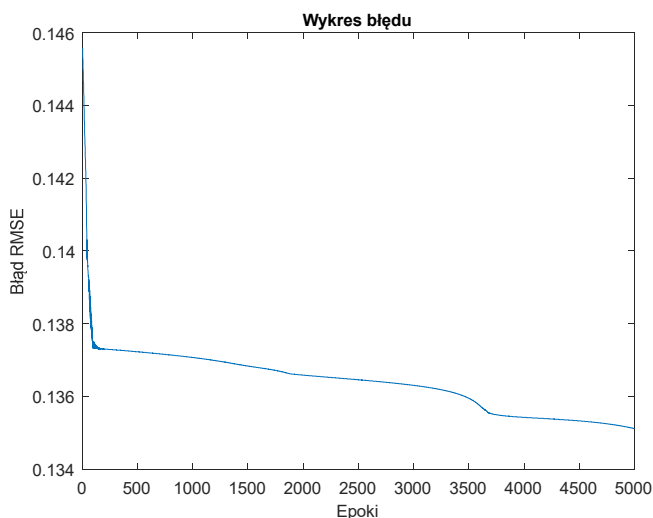
Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.17. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.16.

### 4.2.1.3. Przewidywanie zużycia odpadów nr 130110

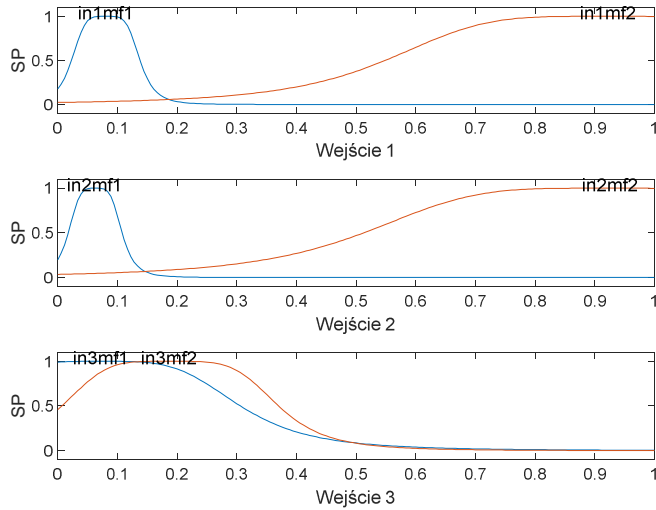
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,1351. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.18. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.18.** Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście

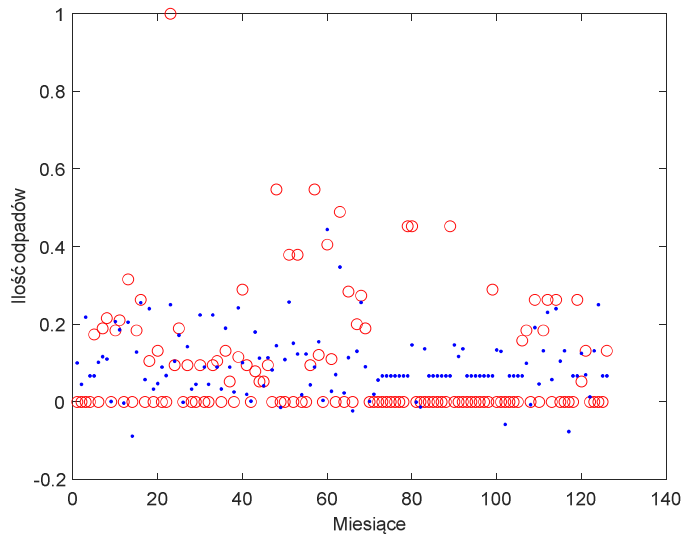
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.19. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących. SP oznacza stopień przynależności.



**Rysunek 4.19. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.20. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.20. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

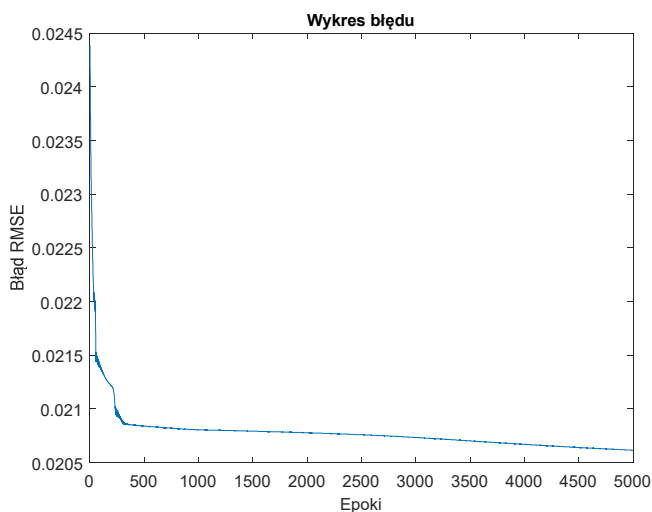
oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.19.

Po procesie uczenia reguły i ich parametry przechowują „wiedzę” zawartą w systemie. Wiedza ta została stworzona w procesie uczenia na podstawie danych numerycznych. Może ona być analizowana lub rozszerzana o nowe reguły przez ekspertów w danej dziedzinie.

#### 4.2.1.4. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150110

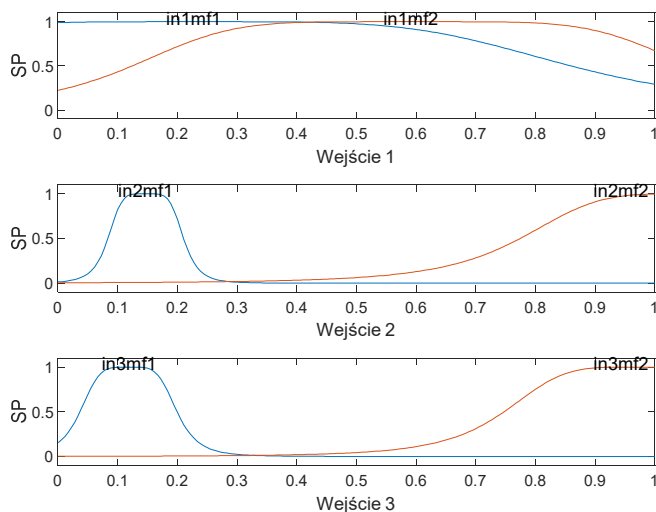
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0206. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.21. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.21. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

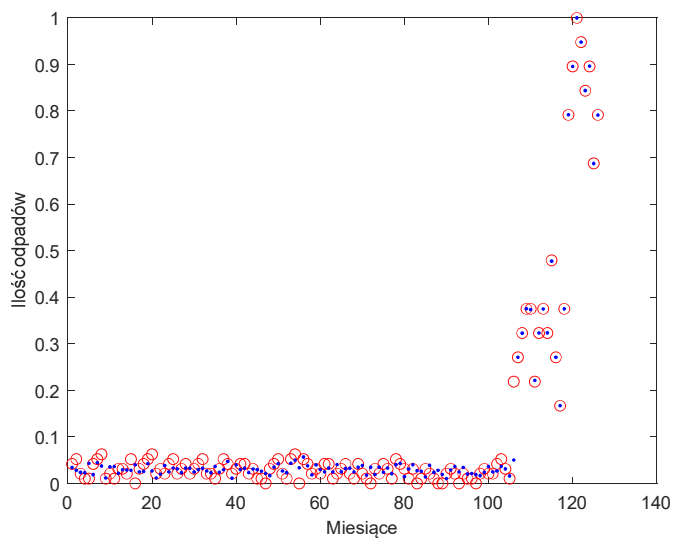
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.22. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.22. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.23. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

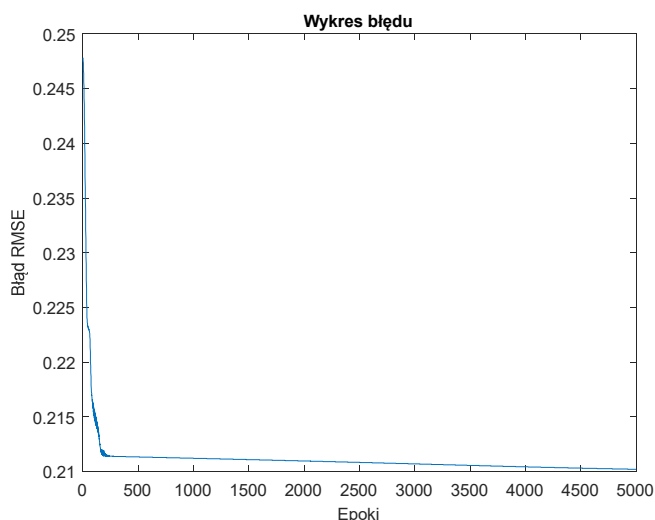
Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.23. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.22.

#### 4.2.1.5. Przewidywanie zużycia odpadów 150202

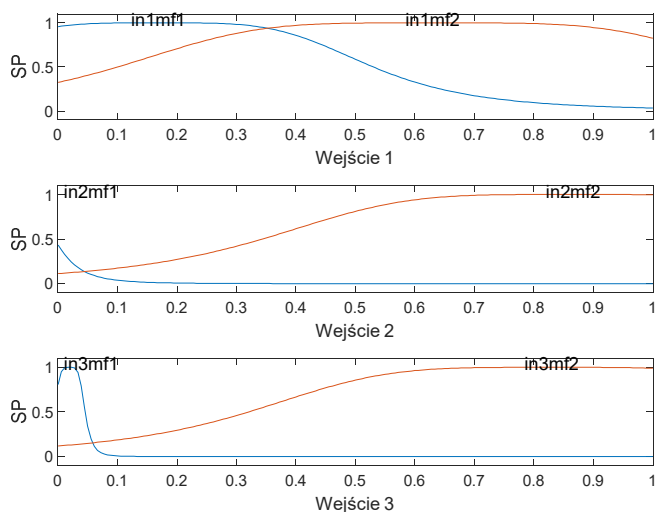
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,2102. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.24. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.24. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

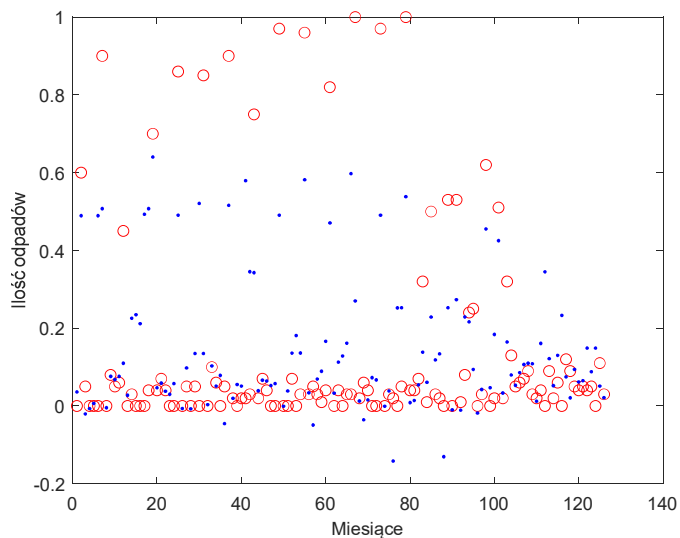
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.25. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.25. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.26. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.26. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

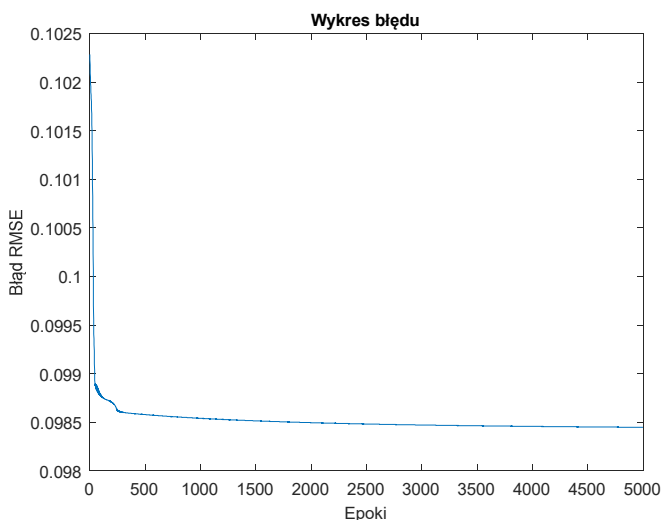


oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.25.

#### 4.2.1.6. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150203

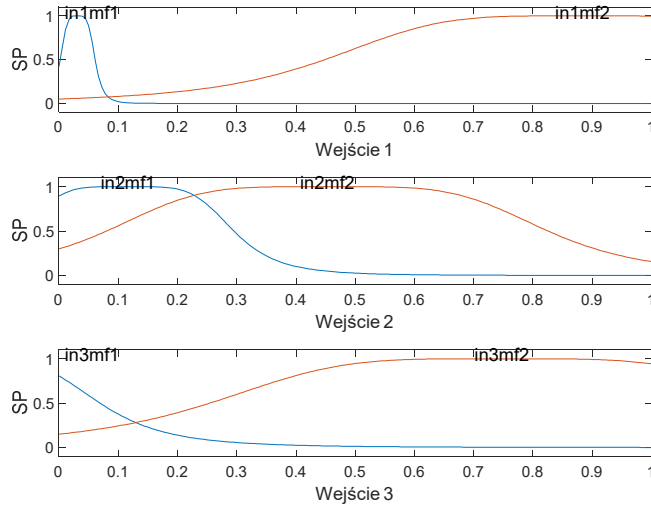
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0984. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.27. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.27. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

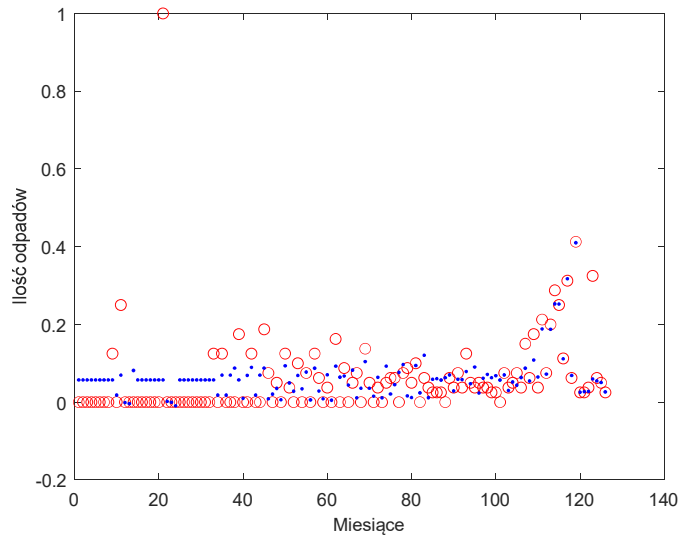
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.28. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.28. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.29. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

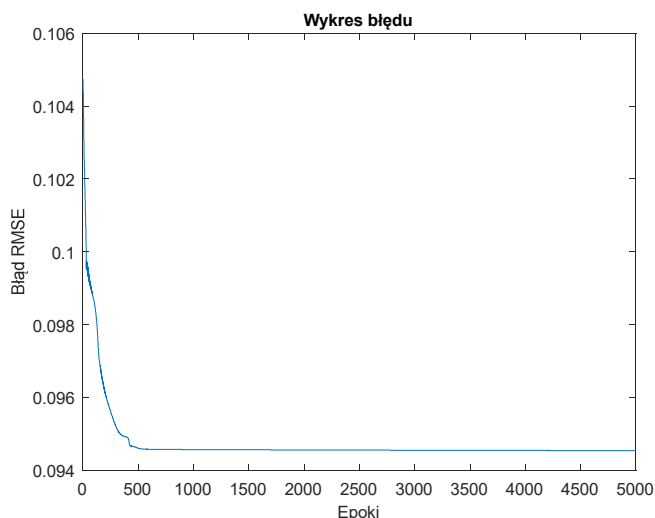
Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.29. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.28.

#### 4.2.1.7. Przewidywanie zużycia odpadów nr 160213

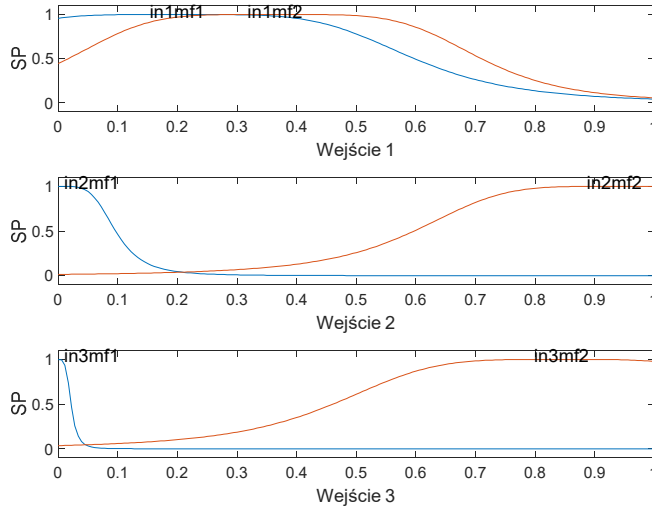
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0945. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.30. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.30. Wykres błędów średniokwadratowych uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

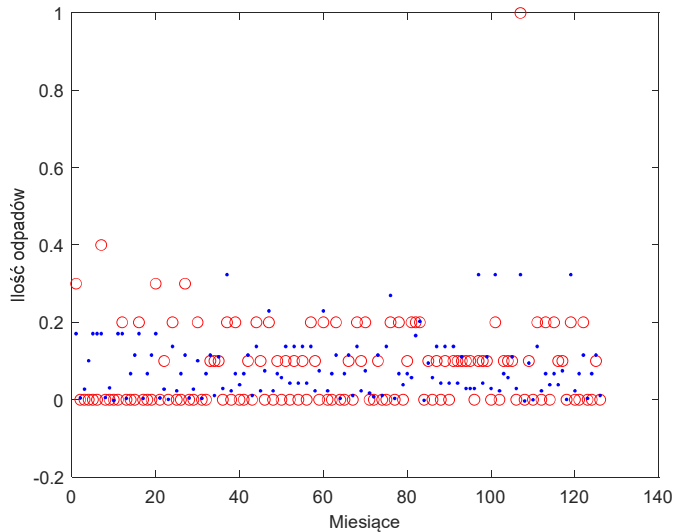
Źródło: opracowanie własne

Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.31. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.31. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne



**Rysunek 4.32. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 160213, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 60213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.32. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa

oraz wartości prognozowane przez nauczone systemy. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.31.

#### 4.2.2. Systemy rozmyte z trzema funkcjami na wejściu

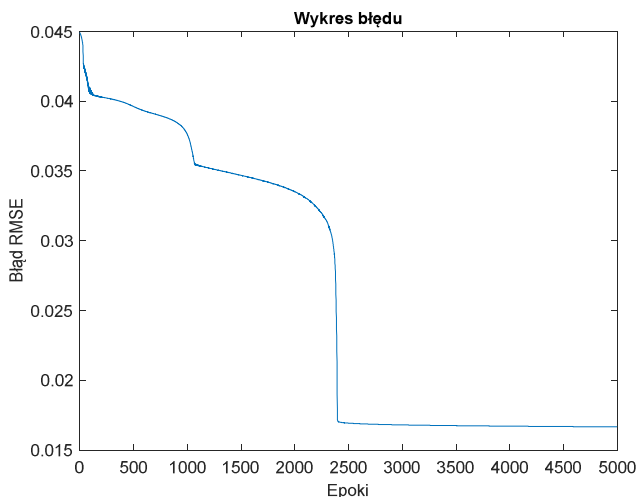
W tym podrozdziale zostaną zaprezentowane badania związane z uczeniem systemów rozmytych o trzech wejściach i trzech funkcjach przynależności na każde z wejść. Ogólna postać reguł wygląda następująco:

1. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf1)
2. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf2)
3. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf3)
4. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf4)
5. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf5)
6. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf6)
7. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf7)
8. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf8)
9. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf9)
10. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf10)
11. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf11)
12. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf12)

13. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf13)
14. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf14)
15. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf15)
16. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf16)
17. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf17)
18. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf18)
19. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf19)
20. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf20)
21. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf21)
22. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf22)
23. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf23)
24. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf24)
25. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf1) then (output is out1mf25)
26. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf2) then (output is out1mf26)
27. If (input1 is in1mf3) and (input2 is in2mf3) and (input3 is in3mf3) then (output is out1mf27)

#### ***4.2.2.1. Przewidywanie zużycia odpadów nr 080111***

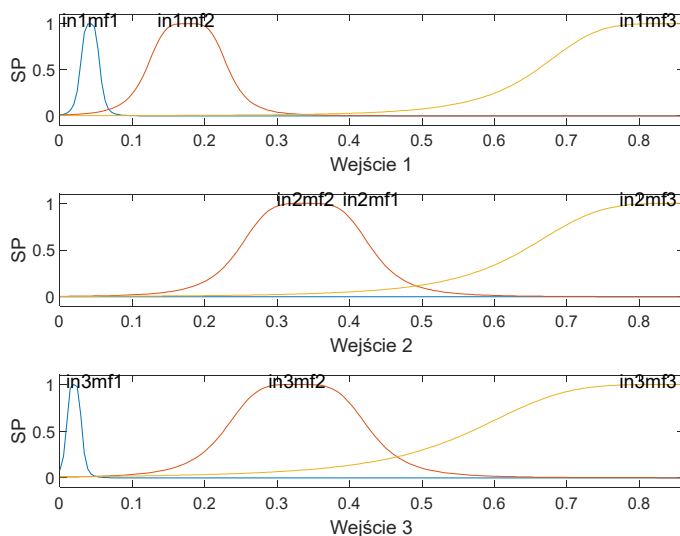
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0167. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.33. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.33. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

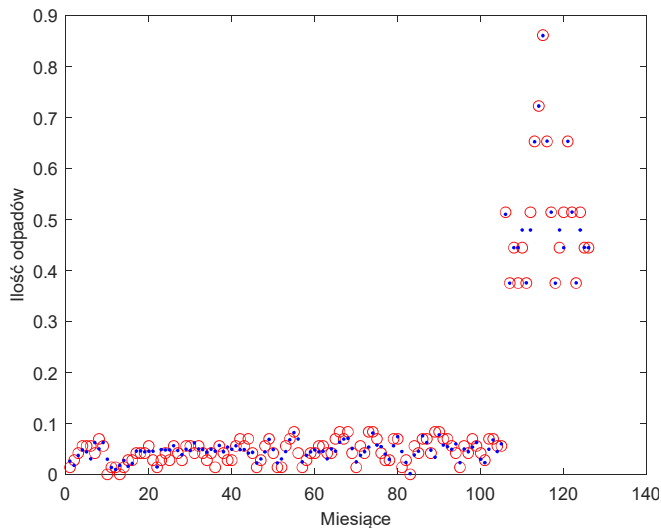
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.34. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.34. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.35. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



**Rysunek 4.35. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

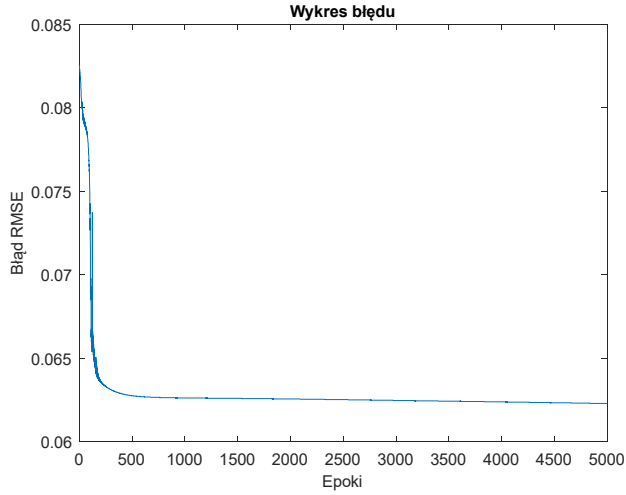
Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.34.

Po procesie uczenia reguły i ich parametry przechowują „wiedzę” zawartą w systemie. Wiedza ta została stworzona w procesie uczenia na podstawie danych numerycznych. Może ona być analizowana lub rozszerzana o nowe reguły przez ekspertów w danej dziedzinie.

#### **4.2.2.2. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150102**

System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0601. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.36. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.

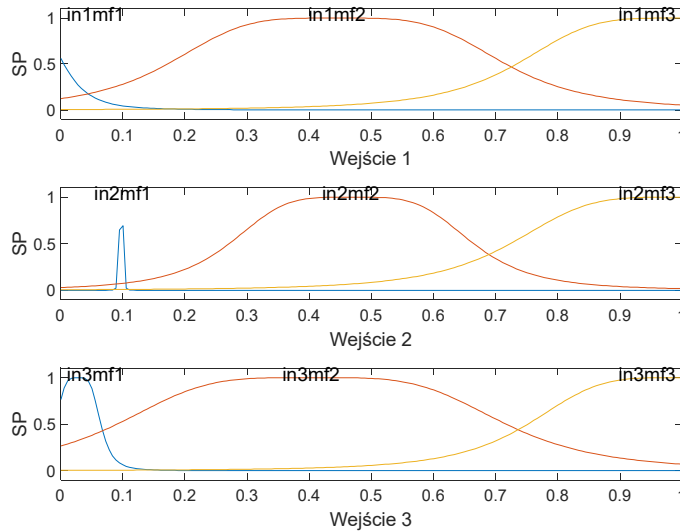




**Rysunek 4.36. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

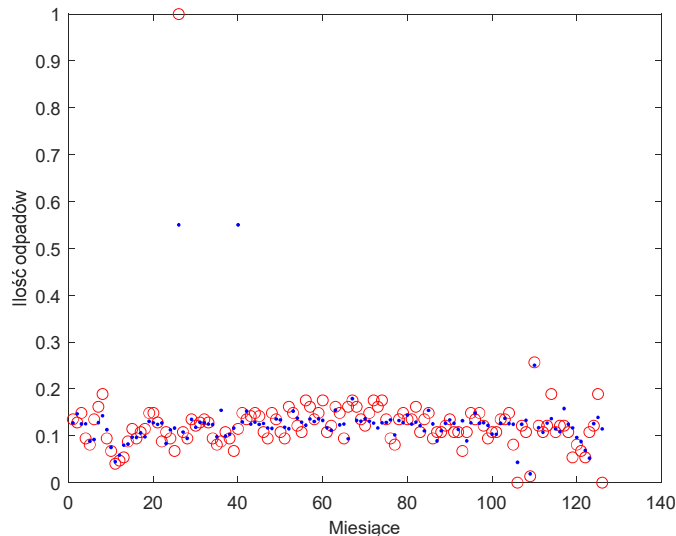
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.37. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.37. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.38. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą licznością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



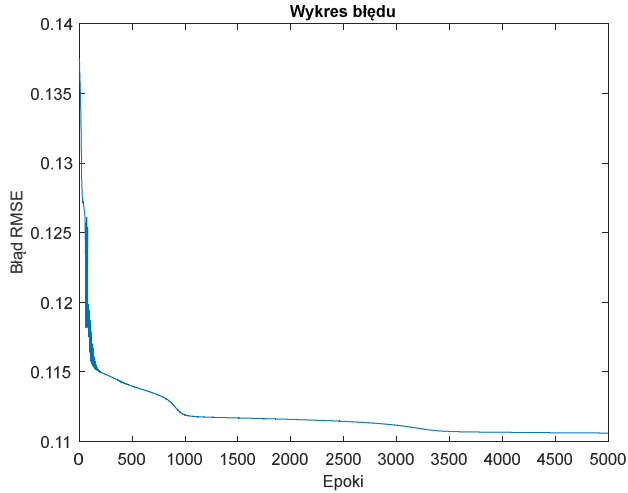
**Rysunek 4.38. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.37.

#### **4.2.2.3. Przewidywanie zużycia odpadów nr 130110**

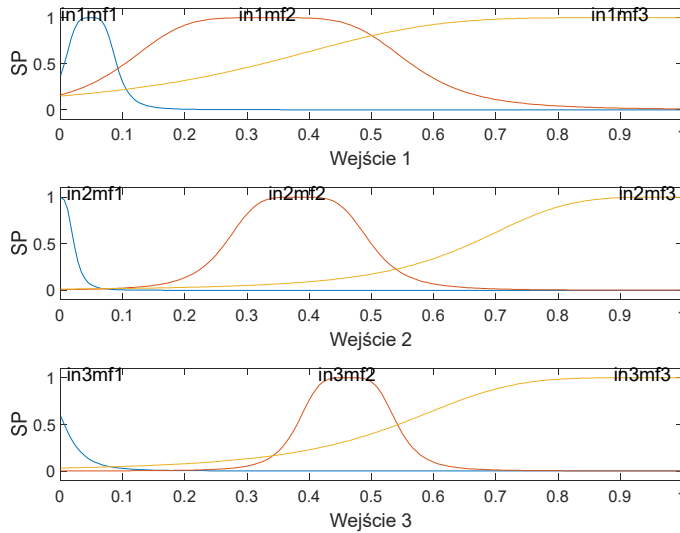
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,1106. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.39. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.39. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

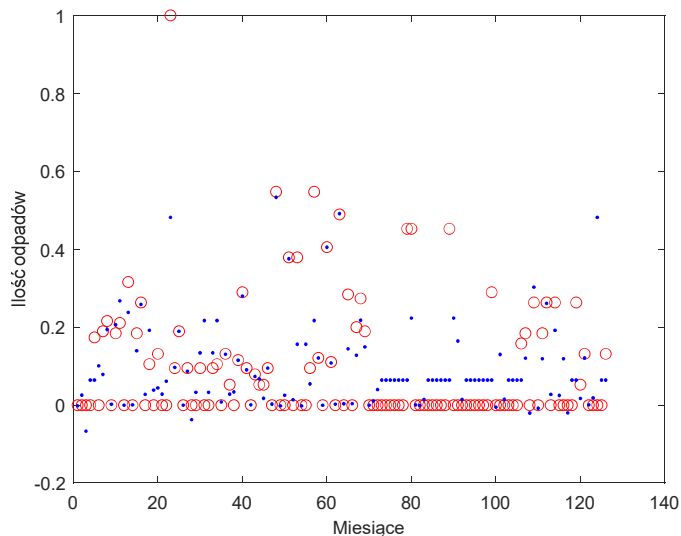
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.40. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.40. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.41. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



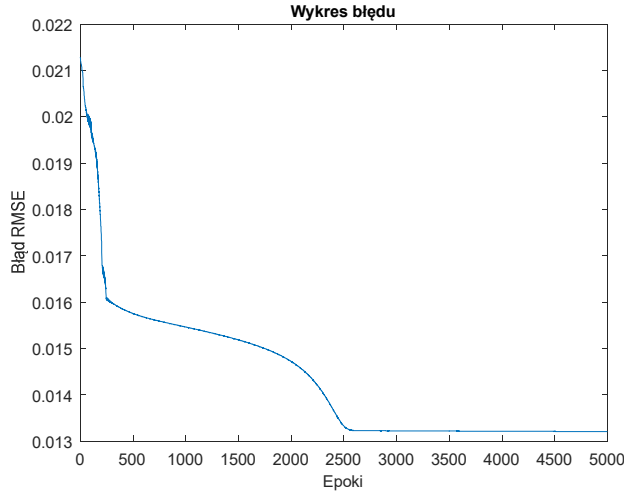
**Rysunek 4.41. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.40.

#### **4.2.2.4. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150110**

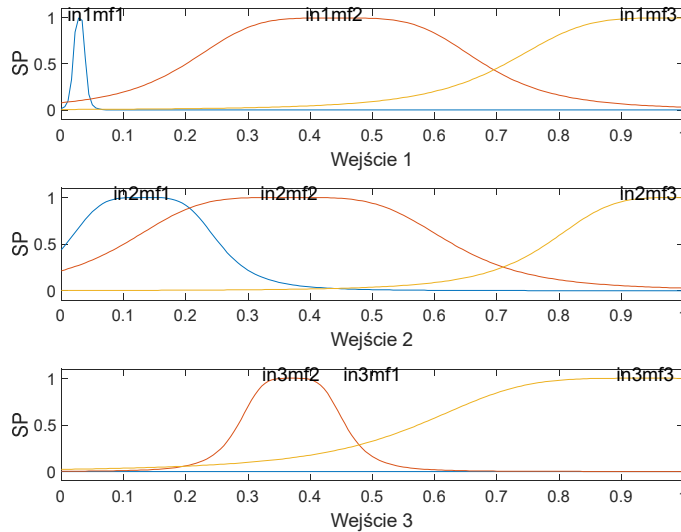
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0132. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.42. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.42. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

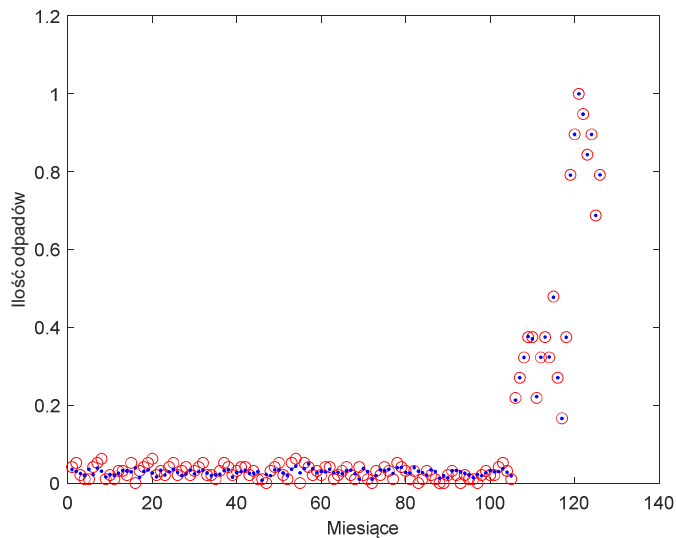
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.43. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.43. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.44. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczony system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą licznością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



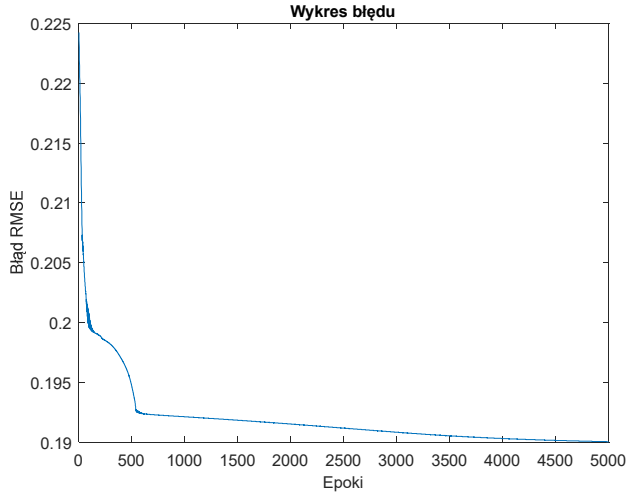
**Rysunek 4.44. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.43.

#### **4.2.2.5. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150202**

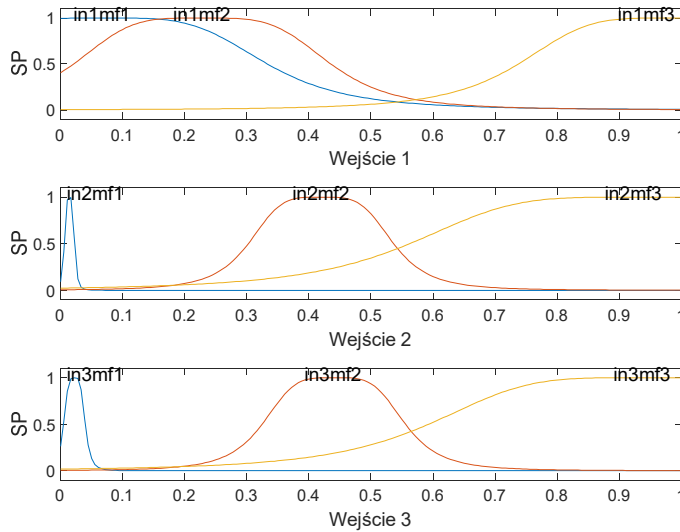
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,1900. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.45. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.45. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

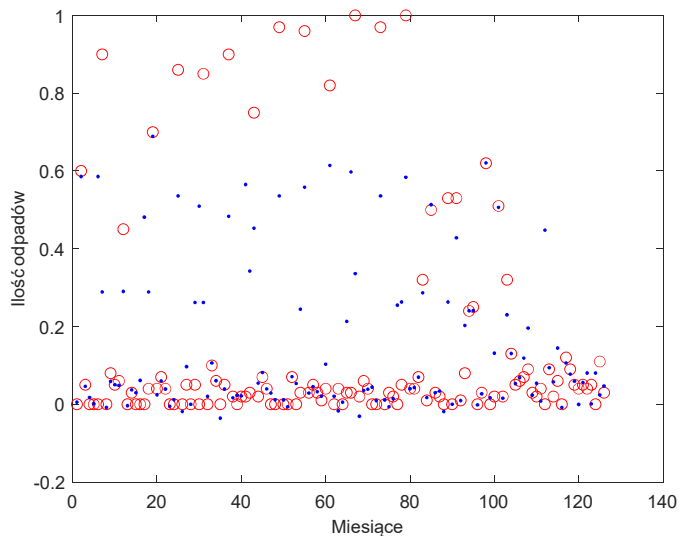
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.46. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.46. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.47. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą licznością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



**Rysunek 4.47. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

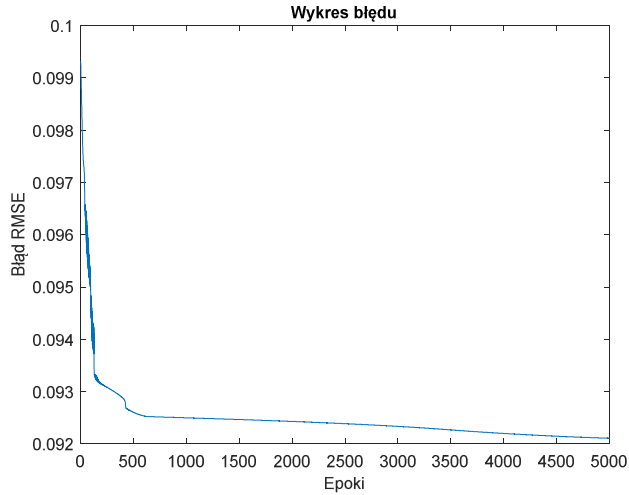
Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.46.

#### **4.2.2.6. Przewidywanie zużycia odpadów nr 150203**

System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0921. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.48. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.

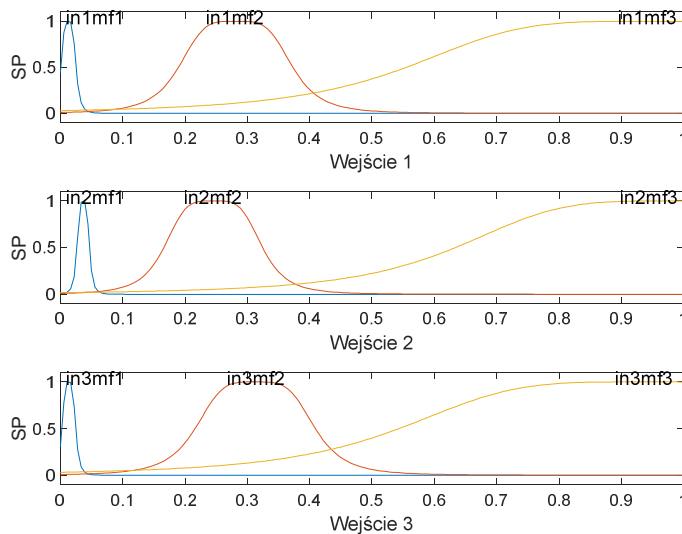




**Rysunek 4.48. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

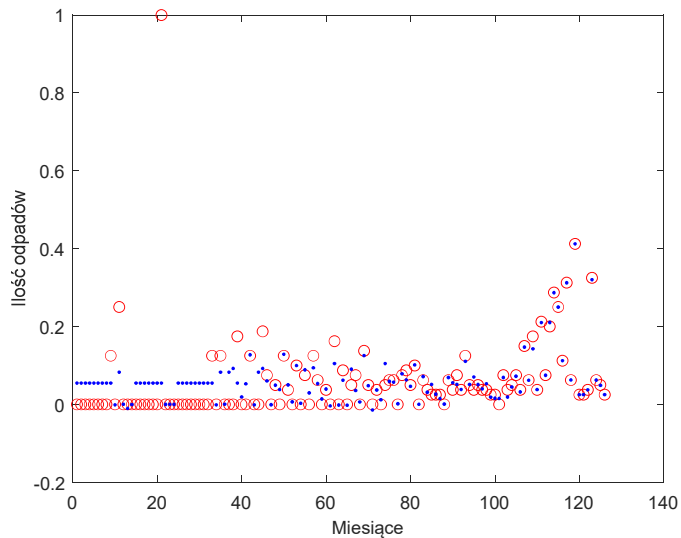
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.49. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.49. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.50. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczonego system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



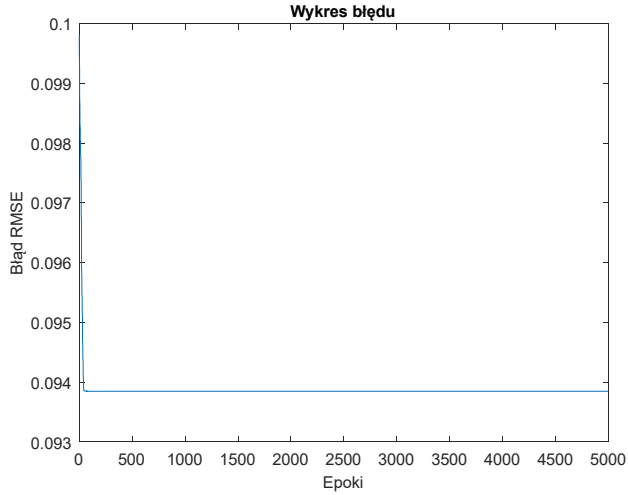
**Rysunek 4.50. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203, „○” oznacza wzorcowe dane uczące, „●” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.49.

#### **4.2.2.7. Przewidywanie zużycia odpadów nr 160213**

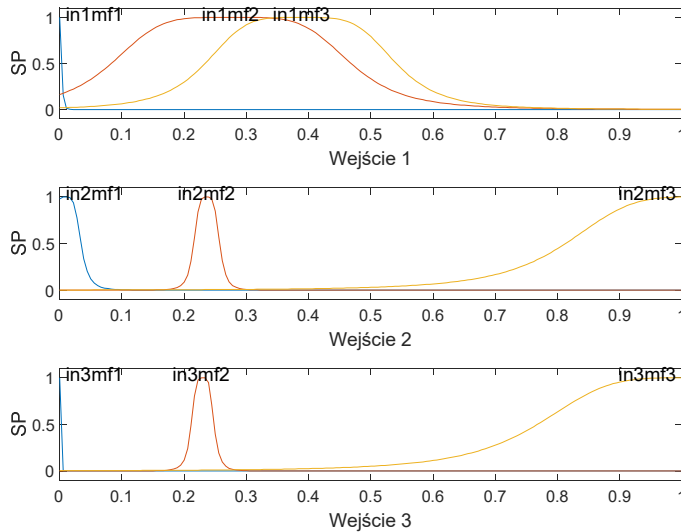
System o trzech wejściach uczony był przez 5000 epok za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędów. Po procesie uczenia błąd średniokwadratowy osiągnął wartość 0,0939. Wykres błędów średniokwadratowych w czasie uczenia przedstawiono na rysunku 4.51. Błąd osiągnął stosunkowo małą wartość.



**Rysunek 4.51. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

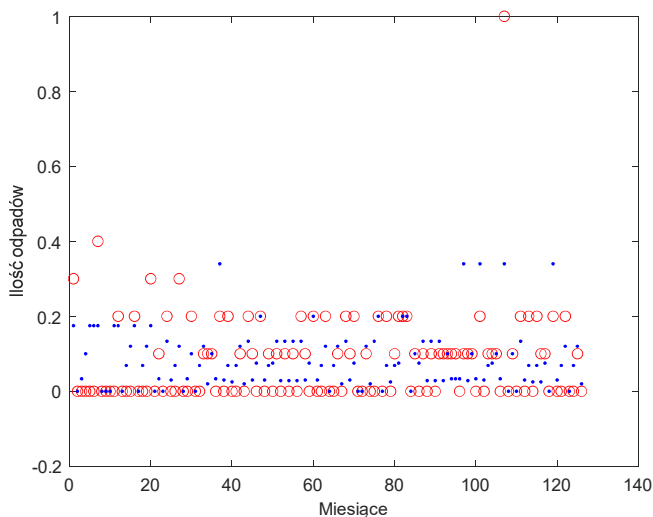
Wykres funkcji przynależności dla poszczególnych wejść po procesie uczenia prezentuje rysunek 4.52. Szerokość i położenie tych funkcji są zmieniane w procesie uczenia tak, aby system w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlał wiedzę zawartą w danych uczących.



**Rysunek 4.52. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście**

Źródło: opracowanie własne

Wykres wartości prognozowanych w czasie testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście przedstawiono na rysunku 4.53. Są to rzeczywiste wartości produkcji z przedsiębiorstwa oraz wartości prognozowane przez nauczony system. Widać rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Wzorcowe dane uczące zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast wartości prognozowane przez wytrenowany system zaznaczono kolorem czerwonym. Drobną rozbieżność pomiędzy tymi wartościami jest spowodowana małą liczebnością zbioru uczącego oraz ogólnym skomplikowaniem tych danych.



**Rysunek 4.53. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 160213, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „•” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system**

Źródło: opracowanie własne

Po procesie uczenia uzyskano zestaw ośmiu reguł. Wejściowe zbiory przynależności z powyższego zestawu reguł przedstawione zostały na rysunku 4.52.

Powyższe eksperymenty przeprowadzono dla trzech wejść i trzech zbiorów rozmytych na wejście. Wartościami dla tych trzech wejść były ilości odpadów w poprzednich miesiącach. Taki układ eksperymentu cechował się wystarczającą dokładnością i umiarkowanym rozbudowaniem systemu. W ten sposób osiągnięto dobry kompromis pomiędzy dokładnością a liczbą reguł rozmytych. Zwiększanie liczby reguł powoduje pogorszenie interpretowalności – wiedza zawarta w systemie staje się coraz trudniejsza do zinterpretowania przez człowieka. Systemy z dwoma zbiorami rozmytymi na wejście również uzyskiwały wystarczającą, choć gorszą dokładność w czasie uczenia, natomiast większe systemy były zbyt skomplikowane do analizy przez człowieka. Rozbudowanie systemu rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem liczby zmiennych lingwistycznych dla poszczególnych wejść.

## Zakończenie

Odpady, szczególnie produkcyjne, są poważnym problemem współczesnej gospodarki. Stanowią duże zagrożenie dla środowiska naturalnego. Społeczność międzynarodowa uznała je za priorytetowy problem globalny. Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej oraz wspólna polityka ekologiczna państw członkowskich spowodowały powstanie ujednoczonych aktów prawnych dotyczących regulacji gospodarki odpadów. Za najważniejsze działania związane z tym problemem uznano odzysk (recykling lub inne formy przetwarzania) oraz unieszkodliwienie (składowanie czy spalanie) odpadów.

Motywacją do podjęcia zaprezentowanej tematyki był brak wsparcia istniejących systemów informatycznych dla logistyki zwrotnej oraz luka badawcza w postaci braku rozwiązań służących do przewidywania wielkości strumieni na podstawie stanów historycznych. Założono, że inteligentne przewidywanie wielkości jej strumieni stanowi determinantę skutecznego zarządzania strumieniami odpadowymi. Przeprowadzone badania wykazały, że podjęcie tematyki było uzasadnione.

Podstawowym obiektem logistyki zwrotnej w przedsiębiorstwie produkcyjnym są materiały odpadowe. Jak pokazują dane statystyczne, najwięcej odpadów powstaje w procesach produkcji. Odpady przemysłowe w Polsce stanowią największy odsetek wszystkich odpadów. Odpady powstałe w wyniku działalności produkcyjnej są zatem głównym obiektem logistyki zwrotnej ze względu na skalę występowania i stopień zagrożenia dla środowiska naturalnego. Logistyka zwrotna ma za zadanie ponownie włączyć odpady – po odpowiednim przetworzeniu – do łańcucha logistycznego jako surowce lub półprodukty.

Ponadto dokonano przeglądu literatury dotyczącej systemów informatycznych pod kątem występowania narzędzi prognozujących produkcję odpadów. Podczas analizy literatury z zakresu systemów informatycznych wspomagających obszar logistyki zwrotnej zauważono brak odpowiednich funkcji wspierających zarządzanie tym obszarem. Systemy informatyczne usprawniają procesy wspomaganie decyzji w całym przedsiębiorstwie, w tym decyzji dotyczących logistyki zwrotnej. Wprowadzenie elementów inteligentnej prognozy może zwiększyć jakość wspomaganie decyzji.

Zastosowanie metod uczenia maszynowego przyczynia się do zwiększenia dokładności prognoz ilości odpadów, a tym samym umożliwia zastosowanie odpowiednich metod postępowania z nimi. Przeprowadzono szereg eksperymentów polegających na tworzeniu i trenowaniu systemów rozmyto-neuronowych.

Do tego celu użyto środowiska obliczeniowego Matlab oraz rzeczywistych danych miesięcznych pochodzących z przedsiębiorstwa produkcyjnego. Po procesie uczenia systemy przewidywały ilość produkcji odpadów na podstawie poprzednich miesięcy. Ilości odpadów w miesiącach poprzedzających były wejściami do systemu rozmyto-neuronowego, a wyjściem stan w kolejnym miesiącu. Błąd, czyli różnica pomiędzy wartością zadaną a wyjściem systemu, osiągnął bardzo małą wartość, przez co prognoza dokonywana w czasie eksperymentów cechuje się wysoką dokładnością. Dzięki temu zarządzanie strumieniami odpadowymi stanie się o wiele łatwiejsze, a sam proces podejmowania decyzji dużo szybszy.

Zarządzanie logistyką zwrótną zwiększa skuteczność przepływów materiałów odpadowych w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Eksperymenty polegające na uczeniu systemów rozmyto-neuronowych dowiodły możliwości precyzyjnego przewidywania produkcji odpadów na podstawie ilości produkowanych w poprzednich okresach. Skuteczność rozumiana jest bowiem jako określony stopień osiągnięcia zamierzonego celu. Analizowane przedsiębiorstwo za cel środowiskowy przyjęło nie tylko minimalizację ilości generowanych odpadów, ale przede wszystkim możliwość jak największego wprowadzenia przetworzonych odpadów ponownie do cyklu gospodarczego. Ilościowe założenia odnośnie do przedsięwzięć redukujących negatywny wpływ wytworzonych odpadów na środowisko naturalne spełnione mogą być jedynie wówczas, jeżeli będzie możliwe przewidzenie wielkości strumieni odpadowych. W ramach zarządzania logistyką zwrótną wykorzystuje się różne metody prognostyczne. Pozwalają one na dokładne prognozowanie ilości odpadów, co przekłada się na zgodne z ilościowymi założeniami planowanie przepływów zwrótnych. Przeprowadzone badania wykazały, że prognozy ilości odpadów sporządzone z zastosowaniem systemów neuronowo-rozmytych ze względu na minimalny błąd prognozy mogą być podstawą procesu decyzyjnego w zakresie przepływów zwrótnych. Badania literaturowe dowiodły natomiast, że sam system gospodarki odpadami nie jest wystarczający do właściwego kształtowania przepływów odpadowych w przedsiębiorstwie i zarządzania nimi. To właśnie zarządzanie logistyką zwrótną umożliwia, zgodnie z założeniami systemowymi, całościowe spojrzenie na problem odpadów w przedsiębiorstwie, traktując je jako wartościowe surowce mogące znaleźć powtórne zastosowanie w systemie gospodarczym.

W ramach badań wykazano, że zastosowanie uczenia maszynowego, a konkretnie systemów neuronowo-rozmytych, może przyczynić się do usprawnienia procesów zarządzania logistyką zwrótną w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Dokładność prognozy przekłada się na skuteczniejsze zarządzanie strumieniami odpadów. W przyszłości z pewnością komputerowe metody analizy danych będą zyskiwały na znaczeniu wraz z rozwojem algorytmów oraz mocy obliczeniowej

komputerów. Staną się nieodzowną częścią systemów zarządzania przedsiębiorstwem, a ludzie będą coraz bardziej polegali na ich ekspertyzie. Bieżąca dekada wydaje się przełomowa, gdyż są dziedziny, w których systemy uczące się uzyskiwały lepsze wyniki niż ludzie. Przykładem tu mogą być sieci neuronowe firm Google oraz Microsoft, które pokonały człowieka już w 2015 roku w zadaniach rozpoznawania obiektów na zdjęciach<sup>179</sup>. W następnych latach uczenie maszynowe okazało się przewyższać zdolności ludzkie w zakresie inteligentnej analizy tekstu, wideo, a nawet obróbki i generowania treści multimedialnych.

---

<sup>179</sup> R.C. Johnson, *Microsoft, Google Beat Humans at Image Recognition*, „EE Times” 2015, [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1325712](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1325712) [dostęp: 08.03.2021].

## Literatura

1. **Abt S., 2000.** *Specyfika logistyki ponad granicami*, [w:] Abt S. (red.), *Logistyka ponad granicami*, s. 9-39, Biblioteka Logistyka, Poznań.
2. **Abt S., Woźniak H., 1993.** *Podstawy logistyki*, Uniwersytet Gdański, Gdańsk.
3. **Adamczyk A., Nitkiewicz T., 2007.** *Programowanie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
4. **Álvarez-Gil M.J., Berrone P., Husillos F.J., Lado N., 2007.** *Reverse Logistics, Stakeholders' Influence, Organizational Slack, and Managers' Posture*, „Journal of Business Research”, 60, s. 463-473.
5. **Amaeshi K., Osuji O., Nnodim P., 2008.** *Corporate Social Responsibility in Supply Chains of Global Brands: A Boundaryless Responsibility? Clarifications, Exceptions and Implications*, „Journal of Business Ethics”, 81, 1, s. 223-234.
6. **Babuška R., 1998.** *Fuzzy Modeling for Control*, Springer, Dordrecht.
7. **Badalek-Taracha P., Ślusarczyk B., 2007.** *Rozwój współczesnej logistyki w świetle nowoczesnych trendów gospodarki*, [w:] Skibińska W., Skowron-Grabowska B. (red.), *Determinanty zarządzania i rozwoju przedsiębiorstw w Unii Europejskiej*, s. 37-43, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
8. **Baker T.J., Zabinsky Z.B., 2011.** *A Multicriteria Decision Making Model for Reverse Logistics Using Analytical Hierarchy Process*, „Omega”, 39, s. 558-573.
9. **Barros A.I., Dekker R., Scholten V., 1998.** *A Two-Level Network for Recycling Sand: A Case Study*, „European Journal of Operational Research”, 110, s. 199-214.
10. **Bebak K., 2002.** *Problem zagospodarowywania odpadów w kontekście ochrony środowiska*, „Logistyka”, 5, s. 30-31.
11. **Bendkowski J., Wengierek M., 2002.** *Logistyka odpadów*, t. 1, *Procesy logistyczne w gospodarce odpadami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
12. **Bengio Y., Courville A., Goodfellow I., 2018.** *Deep Learning. Systemy uczące się*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
13. **Bilitewski B., Hardtle G., Marek K., 2006.** *Podręcznik gospodarki odpadami. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa.
14. **Bishop C.M., 2006.** *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, New York.
15. **Blumberg D.F., 2005.** *Introduction to Management of Reverse Logistics and Closed Loop Supply Chain Processes*, CRC Press, Boca Raton.
16. **Brdulak H., Michniewska K., 2009.** *Logistyka Odzysku*, „Logistyka”, 5, s. 16-21.
17. **Bril J., Łukasik Z., 2011.** *Problematyka odpadów z uwzględnieniem logistycznego systemu gospodarki odpadami*, „Logistyka”, 3 [CD], s. 1653-1664.



18. **Bril J., Łukasik Z., 2012.** *Logistyczny system gospodarki odpadami*, „Logistyka”, 3, s. 185-191.
19. **Brito M.P., Dekker R., Flapper S.D.P., 2003.** *Reverse Logistics – A Review of Case Studies. ERIM Report Series Research in Management*, Erasmus University and the Erasmus School of Economics (ESE), Rotterdam.
20. **Brito M.P., Dekker R., Flapper S.D.P., 2005.** *Reverse Logistics – A Review of Case Studies*, „Distribution Logistics. Advanced Solutions to Practical Problems”, 4, s. 243-281.
21. **Chapple W., Morrison Paul C.J., Harris R., 2005.** *Manufacturing and Corporate Environmental Responsibility: Cost Implications of Voluntary Waste Minimisation*, „Structural Change and Economic Dynamics”, 16, 3, s. 347-373.
22. **Chen C.C., 2011.** *A Waste Management Model for Optimal Recycling – Landfilling Policies under Macroeconomic Conditions*, „Economic Modelling”, 28, s. 852-858.
23. **Chen H.K., Chou H.W., Chiu Y.C., 2007.** *On the Modeling and Solution Algorithm for the Reverse Logistics Recycling Flow Equilibrium Problem*, „Transportation Research. Part C”, 15, s. 218-234.
24. **Choi B., Raghu T.S., Vinze A., 2004.** *Addressing a Standards Creation Process: A Focus on ebXML*, „The International Journal of Human-Computer Studies”, 61, s. 627-648.
25. **Coyle J.J., Bardi E.J., Langrey J.C., 2002.** *Zarządzanie logistyczne*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
26. **CSCMP, Supply Chain Management Definitions and Glosary, 2021.** [https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx) [dostęp: 25.02.2021].
27. **Czolgá E., Pedrycz W., 1985.** *Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych*, PWN, Warszawa.
28. **Dyckhoff H., Lackes R., Reese J., 2004.** *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, Springer, Berlin.
29. **El Korchi A., Millet D., 2011.** *Designing a Sustainable Reverse Logistics Channel: The 18 Generic Structures Framework*, „Journal of Cleaner Production”, 19, s. 588-597.
30. **Fleischmann M., Bloemhof-Ruwaard J.M., Dekker R., van der Laan E., van Nunen J.A.E.E., van Wassenhove L.N., 1997.** *Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review*, „European Journal of Operational Research”, 103, 1, s. 1-17.
31. **Golemska E., 1999.** *Kompendium wiedzy o logistyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
32. **Golemska E., Szymczak M., 1997.** *Informatyzacja w logistyce przedsiębiorstw*, PWN, Warszawa.
33. **Grabara J., 2003.** *Logistyka odwrotna nowym wyzwaniem dla systemów informacyjnych*, [w:] *Nowoczesne technologie informacyjne w zarządzaniu*, „Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu”, 986, s. 461-470.

34. **Grabara J., 2009.** *System gospodarowania odpadami elektronicznymi jako element logistyki zwrotnej*, [w:] Knosala R. (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, s. 366-372, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole.
35. **Guide Jr V.D., Van Wassenhove L.N., 2001.** *Managing Product Returns for Remanufacturing*, „Production and Operations Management”, 10, 2, s. 142-155.
36. **Główny Urząd Statystyczny**, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2022,1,23.html> [dostęp: 24.04.2023].
37. **Hahler S., Fleischmann M., 2013.** *The Value of Acquisition Price Differentiation in Reverse Logistics*, „Journal of Business Economics”, 83, s. 1-28.
38. **Handfield R., 2002.** *Applying Environmental Criteria to Supplier Assessment: A Study in the Application of the Analytical Hierarchy Process*, „European Journal of Operational Research”, 141, 1, s. 70-87.
39. **Hsiao H.I., 2010.** *A Classification of Logistic Outsourcing Levels and Their Impact on Service Performance: Evidence from the Food Processing Industry*, „International Journal of Production Economics”, 124, s. 75-86.
40. **Humpreys P.K., Wong Y.K., Chan F.T.S., 2003.** *Integrating Environmental Criteria into the Supplier Selection Process*, „Journal of Materials Processing Technology”, 138, 1-3, s. 349-356.
41. **Iwan S., 2015.** *Zarządzanie miejskim transportem towarowym w kontekście budowania konsensusu pomiędzy zróżnicowanymi oczekiwaniami jego interesariuszy*, [w:] Witkowski J., Skowrońska A. (red.), *Ekonomiczne, społeczne i środowiskowe uwarunkowania logistyki*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, 383, s. 40-49.
42. **Jaber M.Y., Saadany A.M.A., 2011.** *An Economic Production and Remanufacturing Model with Learning Effects*, „International Journal of Production Economics”, 131, s. 115-127.
43. **Janczewski J., 2013.** *Problematyka zarządzania logistycznego strumieniami powrotnymi*, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec.
44. **Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E., 1996,** *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, Upper Saddle River 1996.
45. **Jayaraman V., Guide V., Srivastava R., 1999.** *A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing*, „Journal of the Operational Research Society”, 50, s. 497-508.
46. **Jeszka A.M., 2014.** *Logistyka zwrotna. Potencjał, efektywność, oszczędności*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań.
47. **Johnson R.C., 2015.** *Microsoft, Google Beat Humans at Image Recognition*, „EE Times”, <https://www.eetimes.com/microsoft-google-beat-humans-at-image-recognition/#> [dostęp: 08.03.2021].
48. **Jung K.S., Hwang H., 2011.** *Competition and Cooperation in a Remanufacturing System with Take-Back Requirement*, „Journal of Intelligent Manufacturing”, 22, s. 247-433.

49. **Jurek J., 2016.** *Wdrożenia informatycznych systemów zarządzania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
50. **Kieltyka L., 2000.** *Inteligentne systemy prognozowania. Zasady funkcjonowania. Zastosowania*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
51. **Kisielnicki J., Sroka H., 1999.** *Systemy informacyjne biznesu. Informatyka dla zarządzania. Metody projektowania i wdrażania systemów*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa.
52. **Klaus P., 2010.** *Logistics as a Science of Networks and Flows*, „Logistics Research”, 2, 2, s. 55-56.
53. **Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej** z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz.U. nr 78 poz. 483).
54. **Kościelniak H., 2006.** *Essence of Capital Supply in a Company*, [w:] Kościelniak H. (red.), *Processes of Capital Supply in Production Enterprises*, s. 7-60, Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
55. **Kopicki R.J., Berg M.J., Legg L., Dasappa V., Maggioni C., 1993.** *Reuse and Recycling: Reverse Logistics Opportunities*, Council of Logistics Management, Oak Brook.
56. **Kot S., 2008.** *Nowe kierunki rozwoju logistyki*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
57. **Korzeń Z., 2001.** *Ekologistyka*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
58. **Kowalski A., Żygadło M., 1998.** *Planowanie, zarządzanie i ochrona środowiska*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
59. **Królik R., Nowodziński P., 2012.** *Logistyka zagospodarowania odpadów zielonych – systemowe rozwiązania*, „Handel Wewnętrzny”, 3, s. 63-70.
60. **Kruczek M., 2012.** *Model łańcucha logistyki odwrotnej zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie”, 60, 1871, s. 165-178.
61. **Kuczyńska-Chalada M., 2015.** *Logistyka powtórnego zagospodarowania odpadów i możliwości jej zastosowania w przedsiębiorstwach hutniczych*, [w:] Knosala R. (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t. 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 890-899.
62. **Kwiatkowska A. 2007.** *Systemy wspomaganie decyzji. Jak korzystać z wiedzy i informacji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
63. **Lambert D.M., Stock J.R., 1981.** *Strategic Physical Distribution Management*, Irwin, Homewood.
64. **Lee A.H.I., 2009.** *A Green Supplier Selection Model for High-Tech Industry*, „Expert Systems with Applications”, 36, 4, s. 7917-7927.
65. **Lee D.H., Dong M., 2009.** *Dynamic Network Design for Reverse Logistics Operations Under Uncertainty*, „Transportation Research. Part E”, 45, 1, s. 61-71.
66. **Levitt T., 1965.** *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review”, 43, s. 81-94.

67. **Ley E., Macauley M.K., Salant S.W., 2002.** *Spatially and Intertemporally Efficient Waste Management: The Costs of Interstate Trade Restrictions*, „Journal of Environmental Economics and Management”, 43, 2, s. 188-218.
68. **Lichocik G., Sadowski A., 2013.** *Koszty logistyki zwrotnej w zarządzaniu łańcuchem dostaw w świetle badań*, „Logistyka”, 2, s. 28-30.
69. **Lieckens K., Vandaele N., 2007.** *Reverse Logistics Network Design with Stochastic Lead Times*, „Computers & Operations Research”, 34, s. 395-416.
70. **Lu Z., Bostel N., 2007.** *A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows: The Case of Remanufacturing Activities*, „Computers & Operations Research”, 34, s. 299-323.
71. **Łukasik Z., Bril J., 2011.** *Problematyka odpadów z uwzględnieniem logistycznego systemu gospodarki odpadami*, „Logistyka”, 3, s. 1653-1664.
72. **Mamdani E.H., Assilian S., 1975.** *An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller*, „International Journal of Man-Machine Studies”, 7, 1, s. 1-13.
73. **Marien E.J., 1998.** *Reverse Logistics as Competitive Strategy*, „Supply Chain Management Review”, 2, 1, s. 43-52.
74. **McKerlie K., Knight N., Thorpe B., 2006.** *Advancing Extended Producer Responsibility in Canada*, „Journal of Cleaner Production”, 14, s. 616-628.
75. **Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F., 2009.** *Facility Location and Supply Chain Management – A Review*, „European Journal of Operational Research”, 196, s. 401-412.
76. **Merkisz-Guranowska A., 2010.** *Logistyka recyklingu odpadów, jako jeden z elementów systemu logistycznego Polski*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, 75, s. 89-96.
77. **Mesjasz-Lech A., 2010.** *Przesłanki rozwoju ekologicznej koncepcji logistyki przedsiębiorstw w Polsce*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej”, 17, 2, s. 277-288.
78. **Mesjasz-Lech A., 2011.** *Makroekonomiczne aspekty logistyki zwrotnej*, „Logistyka”, 2, s. 443-454.
79. **Mesjasz-Lech A., 2012.** *Efektywność ekonomiczna i sprawność ekologiczna logistyki zwrotnej*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
80. **Michniewska K., 2006.** *Nowe trendy w logistyce: logistyka odzysku, a nie ekologia*, „Logistyka”, 1, s. 29-30.
81. **Milanez B., Buhrs T., 2009.** *Extended Producer Responsibility in Brazil: The Case of Tyre Waste*, „Journal of Cleaner Production”, 17, s. 608-615.
82. **Min H., Galle W.P., 1997.** *Green Purchasing Strategies: Trends and Implications*, „International Journal of Purchasing and Materials”, 33, 3, s. 10-17.
83. **Murphy P.R., Poist R.P., 1989.** *Management of Logistical Retromovements: An Empirical Analysis of Literature Suggestions*, „Journal of the Transportation Research Forum”, 29, 1, s. 177-184.

84. **Nahman A., 2010.** *Extended Producer Responsibility for Packaging Waste in South Africa: Current Approaches and Lessons Learned*, „Resources, Conservation and Recycling”, 54, s. 155-162.
85. **Nierzwicki W., 2006.** *Zarządzanie środowiskowe*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
86. **Nitkiewicz T., 2013.** *Ekologiczna ocena cyklu życia produktu w procesach decyzyjnych przedsiębiorstw produkcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
87. **Noci G., 1997.** *Designing 'Green' Vendor Rating Systems for the Assessment of a Supplier's Environmental Performance*, „European Journal of Purchasing & Supply Management”, 3, 2, s. 103-114.
88. **Nowakowski T. (red.), 2011.** *Systemy logistyczne, cz. 2*, Difin, Warszawa.
89. **Nowicka-Skowron M., 2000.** *Efektywność systemów logistycznych*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
90. **Parys T., 2012.** *Systemy informatyczne wspomagające zarządzanie*, „Pomiary. Automatyka. Robotyka”, 16, 7/8, s. 44-51.
91. **Pfohl H.C., 1998.** *Systemy logistyczne. Podstawy organizacji i zarządzania*, Biblioteka Logistyka, Poznań.
92. **Pohlen T.L., Farris M.T., 1992.** *Reverse Logistics in Plastic Recycling*, „International Journal of Physical Distribution and Logistics Management”, 22, 7, s. 35-47.
93. **Reaff M.J., Ammons J.C., Newton D., 2000.** *Strategic Design of Reverse Production System*, „Computers and Chemical Engineering”, 24, s. 991-996.
94. **Rogers D., Tibben-Lembke R.S., 1999.** *Reverse Logistics Challenges*, University of Nevada, Reno.
95. **Rogers D.S., Tibben-Lembke R.S., 1999.** *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, University of Nevada, Reno.
96. **Rogers D.S., Banasiak K., Brokman K., Johnson T., Tibben-Lembke R., 2002.** *Reverse Logistics Challenges*, Council of Logistics Management Annual Conference Proceedings, Oak Brook.
97. **Rosik-Dulewska C., 2002.** *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
98. **Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r.** w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 nr 112 poz. 1206).
99. **Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 30 lipca 2010 r.** w sprawie szczegółowego sposobu postępowania z odpadami medycznymi (Dz.U. 2010 nr 139 poz. 940).
100. **Rushton A., Oxley J., Croucher P., 2000.** *The Handbook of Logistics and Distribution Management*, Kogan Page, London.
101. **Rutkowski L., 2005.** *Metody i techniki sztucznej inteligencji. Inteligencja obliczeniowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
102. **Sadowski A., 2008.** *Zrównoważony rozwój z perspektywy logistyki zwrotnej. Sustainable Development from Reverse Logistics Perspective*, „Problemy Ekorozwoju – Problems of Sustainable Development”, 3, 2, s. 129-132.
103. **Sadowski A., 2009.** *Zarys rozwoju logistyki zwrotnej*, „Logistyka” 5, s. 12-15.

104. **Schroeder D.M., Robinson A.G., 2010.** *Green is Free: Creating Sustainable Competitive Advantage through Green Excellence*, „Organizational Dynamics”, 39, s. 345-352.
105. **Schischke K., Hagelüken M., Steffenhagen G., 2005.** *Wprowadzenie do strategii ekoprojektowania. Dlaczego, co i jak?*, EcoDesign Awareness Raising Campaign for Electrical & Electronics SMEs, Poznań.
106. **Shear H., Speh T.W., Stock J.R., 2003.** *The Warehousing Link of Reverse Logistics*, 26<sup>th</sup> Annual Warehousing Education and Research Council Conference, San Francisco.
107. **Sheu J.B., 2007.** *A Coordinated Reverse Logistics System for Regional Management of Multi-Source Hazardous Wastes*, „Computers & Operations Research”, 34, s. 1442-1462.
108. **Skowron-Grabowska B., 2010.** *Centra logistyczne w łańcuchach dostaw*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
109. **Srivastava S.K., 2008.** *Network Design for Reverse Logistics*, „Omega”, 36, 4, s. 535-548.
110. **Stachura M., Karwasz A., 2007.** *Ekoprojektowanie w praktyce*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją”, 5, s. 53-63.
111. **Starostka-Patyk M., Grabara J., Grabara I., 2011.** *Możliwości wykorzystania technologii RFID w logistyce odwrotnej*, [w:] Knosala R. (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 2, s. 375-385, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole.
112. **Starostka-Patyk M., Nitkiewicz T., 2014.** *Produkty niepełnowartościowe i zarządzanie nimi w koncepcji logistyki odwrotnej*, „Logistyka”, 3, s. 5947-5956.
113. **Stock J.R., 1992.** *Reverse Logistics*, Council of Logistics Management, Oak Brook.
114. **Stock J., Speh T., Shear H., 2002.** *Many Happy (Product) Returns*, „Harvard Business Review”, 80, 7, s. 16-17.
115. **Szołtysek J., 2009.** *Logistyka zwrotna. Reverse logistics*, Biblioteka Logistyka, Poznań.
116. **Szajt M., 2014.** *Przestrzeń w badaniach ekonomicznych*, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
117. **Ślusarczyk B., 2011.** *Podstawy kosztów logistyki przedsiębiorstw*, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
118. **Takagi T., Sugeno M., 1985.** *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control*, „IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics”, 15, 1, s. 116-132.
119. **The Reverse Logistics & Sustainability Council, 2021.** <http://www.reverselogistics.com> [dostęp: 25.02. 2021].
120. **Thierry M.C., Salomon M., Van Nunen J., Van Wassenhove L. 1995.** *Strategic Issues in Product Recovery Management*, „California Management Review”, 37, 2, s. 114-135.

121. **Tibben-Lembke R.S., Rogers D.S., 2002.** *Differences between Forward and Reverse Logistics in a Retail Environment*, „Supply Chain Management: An International Journal”, 7, 5, s. 271-282.
122. **Toffel M.W., 2004.** *Strategic Management of Product Recovery*, „California Management Review”, 46, 2, s. 120-141.
123. **Trajer J., Paszek A., Iwan S., 2012.** *Zarządzanie wiedzą*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
124. **Tuzkaya G., 2009.** *Environmental Performance Evaluation Ofsuppliers: A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision Approach*, „International Journal of Environmental Science and Technology”, 6, 3, s. 477-490.
125. **Ustawa z dnia 27 czerwca 1997 r. o odpadach** (Dz.U. 1997 nr 96).
126. **Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach** (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 628).
127. **Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach** (Dz.U. 2013 poz. 21).
128. **Verstrepen S., Cruijssen F., Brito M.P., Dullaert W., 2007.** *An Exploratory Analysis of Reverse logistics in Flanders*, „European Journal of Transport and Infrastructure Research”, 7, 4, s. 301-316.
129. **Vogt J., Pienaar W., de Wit P., 2002.** *Business Logistics Management. Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford.
130. **Walton S.V., Handfield R.B., Melnyk S.A., 2006.** *The Green Supply Chain: Integrating Suppliers into Environmental Management Processes*, „Journal of Supply Chain Management”, 34, 2, s. 2-11.
131. **Witkowski K., 2012.** *Processes of Reverse Logistics and Recycling of Plastics in Automotive Industry*, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
132. **Witkowski K., 2015.** *Aspekty logistyki odzysku i recyklingu tworzyw sztucznych*, „Logistyka”, 2 [CD1], s. 796-803.
133. **Witkowski K., 2015.** *Aspekt logistyki zwrotów i recyklingu tworzyw sztucznych*, [w:] *Ekonomiczne, społeczne i środowiskowe uwarunkowania logistyki*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, 383, s. 302-317.
134. **Władacz M., 2003.** *Gospodarka odpadami. Poradnik przedsiębiorcy*, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, Warszawa.
135. **Xiang W., Ming C., 2011.** *Implementing Extended Producer Responsibility: Vehicle Remanufacturing in China*, „Journal of Cleaner Production”, 19, s. 680-686.
136. **Zhang L.J., Chang H., 2002.** *E-Logistics Processes Integration Using Web Services*, [w:] *E-Logistics Web Services Business Strategies and Architectures*, s. 100-115, Apress, Berkeley.
137. **Zhou X., Zhang M., 2009.** *Research on Reverse Logistics Network Design of Household Appliances Based on Green Logistics*, „International Journal of Business and Management”, 4, 9, s. 251-256.
138. **Zieliński J., 2002.** *Inteligentne systemy w zarządzaniu. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

## Spis rysunków

Rysunek 1.1. Tradycyjne i odwrotne przepływy surowców, materiałów i produktów .....	14
Rysunek 1.2. Przepływy w łańcuchu dostaw w logistyce tradycyjnej i zwrotnej ....	17
Rysunek 1.3. Hierarchia sposobów postępowania z odpadami .....	20
Rysunek 1.4. Model systemu przepływu zasobów .....	29
Rysunek 2.1. Odpady przemysłowe wytworzone w Polsce w ciągu roku [w tysiącach ton] .....	44
Rysunek 2.2. Odpady wytworzone w Polsce w ciągu roku ogółem [w tysiącach ton] .....	45
Rysunek 2.3. Cykl życia produktu .....	49
Rysunek 3.1. Schemat blokowy systemu rozmytego .....	53
Rysunek 3.2. Model neuronu .....	55
Rysunek 3.3. Klasyfikacja sieci neuronowych .....	56
Rysunek 3.4. Schemat trójwarstwowej sieci neuronowej .....	57
Rysunek 3.5. Schemat systemu neuronowo-rozmytego .....	61
Rysunek 3.6. Przykłady funkcji przynależności zbiorów rozmytych stosowane w systemach neuronowo-rozmytych .....	62
Rysunek 3.7. Schemat blokowy algorytmu uczenia sieci neuronowo-rozmytych ...	63
Rysunek 4.1. Wykres przedstawiający ilość odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019. Masa odpadów została przedstawiona w kg .....	67
Rysunek 4.2. Miesięczny wykres produkcji odpadów powstałych z farb i lakierów (kod 080111) .....	67
Rysunek 4.3. Miesięczny wykres produkcji odpadów mineralnych olejów hydraulicznych (kod 130110) .....	68
Rysunek 4.4. Miesięczny wykres produkcji odpadów powstałych z opakowań z tworzyw sztucznych (kod 150102) .....	68
Rysunek 4.5. Miesięczny wykres produkcji opakowań zawierających pozostałości substancji niebezpiecznych (kod 150110) .....	69
Rysunek 4.6. Miesięczny wykres produkcji tkanin do wycierania (kod 150202) ....	69
Rysunek 4.7. Miesięczny wykres produkcji odpadów zawierających ubrania ochronne (kod 150203) .....	70



Rysunek 4.8. Miesięczny wykres produkcji odpadów: zużyte urządzenia zawierające niebezpieczne elementy (kod 160213) .....	70
Rysunek 4.9. Macierz korelacji poszczególnych odpadów .....	71
Rysunek 4.10. Przykład struktury rozmyto-neuronowej z trzema wejściami i jednym wyjściem .....	74
Rysunek 4.11. Przykład początkowych funkcji przynależności dla struktury rozmyto-neuronowej z trzema wejściami, jednym wyjściem i trzema funkcjami na wejście .....	75
Rysunek 4.12. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	78
Rysunek 4.13. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	79
Rysunek 4.14. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	79
Rysunek 4.15. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	80
Rysunek 4.16. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	81
Rysunek 4.17. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	81
Rysunek 4.18. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	82
Rysunek 4.19. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	83
Rysunek 4.20. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	83
Rysunek 4.21. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	84
Rysunek 4.22. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	85
Rysunek 4.23. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	85

Rysunek 4.24. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	86
Rysunek 4.25. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	87
Rysunek 4.26. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	87
Rysunek 4.27. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	88
Rysunek 4.28. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	89
Rysunek 4.29. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	89
Rysunek 4.30. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	90
Rysunek 4.31. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	91
Rysunek 4.32. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 160213, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	91
Rysunek 4.33. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	94
Rysunek 4.34. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 080111 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	94
Rysunek 4.35. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 080111, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	95
Rysunek 4.36. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	96
Rysunek 4.37. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150102 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	96
Rysunek 4.38. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150102, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	97

Rysunek 4.39. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	98
Rysunek 4.40. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 130110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	98
Rysunek 4.41. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 130110, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	99
Rysunek 4.42. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	100
Rysunek 4.43. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150110 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	100
Rysunek 4.44. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150110, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	101
Rysunek 4.45. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	102
Rysunek 4.46. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150202 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	102
Rysunek 4.47. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150202, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	103
Rysunek 4.48. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	104
Rysunek 4.49. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 150203 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	104
Rysunek 4.50. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 150203, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	105
Rysunek 4.51. Wykres błędu średniokwadratowego uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	106
Rysunek 4.52. Wykres wejściowych funkcji przynależności po procesie uczenia dla odpadów o kodzie 160213 przy dwóch funkcjach przynależności na wejście .....	106
Rysunek 4.53. Wykres testu systemu po uczeniu dla odpadów o kodzie 160213, „o” oznacza wzorcowe dane uczące, „.” oznacza wartości prognozowane przez wytrenowany system .....	107

## Spis tabel

Tabela 1.1. Ewolucja koncepcji logistyki zwrotnej w literaturze obcojęzycznej .....	9
Tabela 1.2. Różnice pomiędzy logistyką a logistyką zwrotną .....	15
Tabela 4.1. Suma odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019. Masa odpadów została przedstawiona w kg .....	66
Tabela 4.2. Udział procentowy odpadów zgrupowanych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów w latach 2009-2019 w całości w poszczególnych latach .....	66