

Marcin Relich

Wydział Ekonomii i Zarządzania
Uniwersytet Zielonogórski
Licealna 9, 65-417 Zielona Góra
E-mail: m.relich@wez.uz.zgora.pl

Wybór portfela projektów nowych produktów z uwzględnieniem niezawodności produktu

Słowa kluczowe: *estymacja kosztu, warianty alternatywne projektu, problem spełniania ograniczeń, programowanie w logice z ograniczeniami, system wspomagania decyzji*

Streszczenie: Wybór portfela projektów nowych produktów jest jedną z najistotniejszych decyzji podejmowanych w przedsiębiorstwie, wpływającą na przyszłą wartość zysków oraz konkurencyjność i rozwój przedsiębiorstwa. Zapewnienie niezawodności produktu jest kosztowne, ale zwiększa satysfakcję klienta z używanego produktu i redukuje koszty potencjalnych napraw gwarancyjnych, przyczyniając się do sukcesu rynkowego produktu. Celem artykułu jest opracowanie podejścia umożliwiającego budowę systemu wspomagania decyzji dotyczących wyboru portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia, z uwzględnieniem aspektu zapewnienia wymaganej niezawodności produktu. Problem wyboru portfela projektów nowych produktów został wyrażony w postaci problemu spełniania ograniczeń, co umożliwia zaprojektowanie systemu opartego na bazie wiedzy. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych dotyczący alternatywnych projektów rozwoju nowych produktów jest otrzymywany z wykorzystaniem technik programowania w logice z ograniczeniami. Opracowane podejście jest dedykowane dla przedsiębiorstw, które realizują strategię modernizacji wytwarzanego produktu.

1. Wstęp

Rozwój nowego produktu i jego wprowadzenie na rynek jest jednym z najważniejszych procesów biznesowych we współczesnym przedsiębiorstwie. W związku z bardzo dynamicznym rozwojem techniki i technologii, zwiększającymi się oczekiwaniami ze strony klienta oraz zwiększeniem poziomu globalnej konkurencji, nastąpiło skrócenie cyklu życia produktu [8, 11]. W przypadku rozbudowanych produktów i ograniczonych zasobów (np. finansowych, kadrowych), opracowanie rozwiązań innowacyjnych w krótkim okresie jest utrudnione. W konsekwencji przedsiębiorstwa często preferują strategię modernizacji wytwarzanego produktu, która ma na celu dopasowanie produktu do zmieniających się wymagań klientów [8, 31]. Modernizacja już wytwarzanego produktu redukuje czas, koszt i ryzyko związane z projektowaniem od podstaw nowego produktu [13, 15, 28]. Szybsze wprowadzenie produktu na rynek może zapewnić przedsiębiorstwu przewagę nad konkurentami. Jednakże skrócenie czasu projektowania produktu może skutkować obniżeniem jego niezawodności, a w konsekwencji doprowadzić do zwiększenia kosztu napraw gwarancyjnych czy wymiany produktu na nowy. Ponadto, spadek zaufania klientów w zakresie jakości sprzedawanych przez przedsiębiorstwo produktów może w konsekwencji doprowadzić do spadku sprzedaży i zysku. Z drugiej strony zwiększone nakłady w zakresie testowania produktu na etapie badań i rozwoju prowadzą zazwyczaj do wzrostu ceny produktu, co również jest niekorzystnie odbierane przez klienta. Powstaje wobec tego

potrzeba systemowego podejścia do zapewnienia wymaganej niezawodności produktu, realizowanego już na etapie wyboru portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia.

Niezawodność jest zdolnością do utrzymywania gotowości wypełniania przez produkt wymaganych zadań w ustalonych warunkach i w określonym przedziale czasu użytkowania [22]. W literaturze przedmiotu niezawodność produktu jest szeroko rozważana w aspekcie inżynierskim (np. jako wyznaczanie modeli naprężania/odkształcania materiałów na etapie testowania nowego produktu), mającym na celu poprawę trwałości produktu i zapewnienie wymaganego normami bezpieczeństwa użytkowania produktu [7, 12]. Rzadziej niezawodność produktu jest rozpatrywana w ujęciu systemowym, w którym odnosi się ona do wszystkich etapów cyklu życia produktu i umożliwia ustalenie jej zgodności z celami biznesowymi przedsiębiorstwa, takimi jak satysfakcja klienta, wzrost sprzedaży, redukcja kosztów rozwinięcia produktu, jego produkcji i napraw gwarancyjnych.

Murthy [22] proponuje system podejmowania decyzji dotyczących ustalenia parametrów niezawodności produktu, bazujący na minimalizacji kosztu napraw gwarancyjnych i rozwinięcia produktu oraz na modelu użytkowania produktu. Autor ten rozważa zapewnienie niezawodności produktu na trzech poziomach: całego przedsiębiorstwa, produktu i pojedynczego komponentu produktu, a także w trzech fazach cyklu życia produktu: koncepcyjnej, rozwinięcia i sprzedaży. Z kolei Kumar [19] przedstawia system zarządzania bezpieczeństwem produktu oparty na bazie wiedzy, uwzględniającej proces wytwarzania produktu i otoczenie przedsiębiorstwa (wymagania klientów, jakość materiałów od dostawców). Rozwiązania te rozpatrują niezawodność produktu w ujęciu systemowym, jednakże nie przedstawiają jej wpływu na wybór optymalnego portfela projektów nowych produktów. Biorąc pod uwagę fakt, że niezawodność produktu wpływa na satysfakcję klienta, wielkość sprzedaży i poziom kosztów, istotnym wydaje się jej uwzględnienie przy wyznaczaniu portfela nowych produktów do rozwinięcia i wsparcie decydenta przy wyborze tego portfela. Stanowi to motywację do opracowania podejścia umożliwiającego budowę systemu wspomaganie decyzji o wyborze portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia, z uwzględnieniem aspektu zapewnienia wymaganej niezawodności produktu.

Ocena niezawodności produktu w jego różnych fazach życia może bazować na informacjach obiektywnych (np. dane z symulacji komputerowych, testowania prototypów) i informacjach subiektywnych (np. doświadczenia z wcześniejszych podobnych produktów, opinie ekspertów) [25]. Chin [10] przedstawia natomiast wykorzystanie informacji pozyskanych od klienta i z przedsiębiorstwa (cele biznesowe, zasoby i ograniczenia) do oceny niezawodności produktu, procesu projektowania i produkcji, czasu rozwinięcia produktu i jego produkcji oraz kosztu, na etapie wstępnego projektowania produktu. Wymienione podejścia do oceny niezawodności produktu i kosztu jego rozwinięcia oraz produkcji wykorzystują informacje z otoczenia i samego przedsiębiorstwa, które można przedstawić w postaci zbiorów zmiennych i ograniczeń. W odróżnieniu od powyższych podejść, w niniejszym opracowaniu proponuje się wykorzystanie zbiorów zmiennych i ograniczeń do sformułowania problemu wyboru portfela nowych produktów w postaci problemu spełniania ograniczeń (PSO), który umożliwia projektowanie bazy wiedzy systemu wspomaganie decyzji i wykorzystanie deklaratywnych języków programowania do efektywnego wyznaczenia zbioru rozwiązań alternatywnych.

Tradycyjna analiza niezawodności produktu wymaga specyfikacji parametrów rozkładu uszkodzeń produktu i przyjęcia pewnych założeń, które są czasami trudne do zweryfikowania [33]. Między innymi te trudności stały się podstawą zastosowania algorytmów heurystycznych w celu estymacji niezawodności produktu, wśród których znajdują się sieci neuronowe [21, 33], systemy oparte na logice rozmytej [34, 35] i algorytmy ewolucyjne [9, 30]. W niniejszym opracowaniu wykorzystano system rozmyto-neuronowy do

identyfikacji zależności w obszarze estymacji niezawodności produktu, kosztu rozwinięcia produktu i jego produkcji.

Niezawodność produktu można mierzyć na wiele sposobów, na przykład jako średni czas do wystąpienia uszkodzenia, intensywność uszkodzeń, średni czas usunięcia uszkodzenia, średni czas pomiędzy uszkodzeniami, średnia trwałość (średnia długość życia produktu), dyspozycyjność (czas działania wyrażony jako relacja czasu działania i napraw) [2, 16]. Projektant wyrobu postrzega niezawodność produktu poprzez jego cechy (np. związane z niezawodnością wykorzystanych materiałów), natomiast konsument postrzega niezawodność produktu poprzez jego atrybuty (np. trwałość). Każde uszkodzenie produktu zmniejsza poziom satysfakcji klienta z używanego produktu, przy czym czas wystąpienia pierwszego uszkodzenia istotnie wpływa na ten poziom [22]. Z tego powodu jako miarę niezawodności produktu przyjęto w niniejszej pracy średnią liczbę cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia.

Rozdział 2 zawiera sformułowanie problemu wyboru portfela nowych produktów w postaci PSO. W rozdziale 3 przedstawiono proponowaną metodę budowy systemu wspomagania decyzji (SWD) dla wyboru portfela projektów nowych produktów. Rozdział 4 zawiera przykład ilustrujący estymację kosztu opracowania nowego produktu, niezawodności produktu i kosztu napraw gwarancyjnych, wybór portfela produktów do rozwinięcia oraz wyznaczanie rozwiązań dopuszczalnych dla zadanej niezawodności produktu. W ostatnim rozdziale przedstawiono uwagi końcowe dotyczące możliwości i ograniczeń zastosowania proponowanego podejścia do wyboru portfela produktów do rozwinięcia z uwzględnieniem aspektu niezawodności produktu.

2. Sformułowanie problemu wyboru portfela nowych produktów w postaci PSO

Proces opracowania nowego produktu składa się z sekwencji następujących etapów: identyfikacja potrzeb klientów, generowanie pomysłów na nowe produkty, wybór portfela nowych produktów do rozwinięcia, budowa i testowanie prototypów nowego produktu [27, 31, 32]. Szczególne miejsce w tym procesie zajmuje etap wyboru portfela nowych produktów do rozwinięcia, ponieważ niewłaściwa identyfikacja potencjału koncepcji nowego produktu skutkuje znacznymi wydatkami na rozwinięcie i marketing chybionych produktów i pomniejszeniem środków na rozwinięcie alternatywnych, bardziej rentownych produktów.

Ograniczone zasoby przedsiębiorstwa wymuszają wybór i rozwinięcie tylko najbardziej obiecujących projektów nowych produktów ze zbioru opracowanych koncepcji. W sytuacji ograniczonego budżetu na badania i rozwój (B+R) szczególnego znaczenia nabiera jakość estymacji kosztu rozwinięcia nowego produktu. Jeżeli projekty nowych produktów nie różnią się istotnie w zakresie wykonanych prac rozwojowych od wcześniejszych projektów, wówczas do oszacowania kosztu rozwinięcia nowego produktu można wykorzystać wartości średnie kosztu dla danej linii produktów [5, 14]. Jednakże często występuje sytuacja, w której projekty nowych produktów wchodzących w skład tej samej linii mają różny zakres prac rozwojowych, od niewielkich modyfikacji po znaczne zmiany w konstrukcji produktu [14, 23]. W tej sytuacji proponuje się wyznaczenie zmiennych związanych z produktem, przedsiębiorstwem i jego otoczeniem, które w istotny sposób wpływają na koszt opracowania nowego produktu, a następnie ich wykorzystanie do estymacji tego kosztu. Dodatkowym kryterium wyboru tych zmiennych do modelu prognostycznego jest możliwość oszacowania ich wartości na etapie projektowania koncepcyjnego produktu, czyli zanim produkt przejdzie do fazy projektowania szczegółowego, budowy i testowania prototypów. Przykładem tego rodzaju zmiennych może być:

- liczba dodatkowych cech nowego produktu zgłaszana przez klientów,

- liczba elementów w nowym produkcie,
- liczba nowych elementów w produkcie,
- liczba pracowników uczestnicząca w pracach koncepcyjnych, konstrukcyjnych czy testowania prototypów nowego produktu,
- liczba maszyn i urządzeń wymaganych do budowy prototypu czy testowania nowego produktu,
- liczba elementów w nowym produkcie przewidzianych do obróbki/montażu,
- liczba i koszt materiałów wymaganych do budowy nowego produktu.

Zapewnienie wymaganej niezawodności produktu R jest kosztownym procesem, związanym z wypełnieniem oczekiwań zgłaszanych przez potencjalnych klientów nowego produktu, zakresem prac projektowych, testowaniem kolejnych prototypów produktu, wymaganymi materiałami czy opracowaniem nowej technologii produkcji [20]. Zwiększenie niezawodności produktu ma na celu zmniejszenie kosztów potencjalnych napraw gwarancyjnych C_{wi} oraz zwiększenie satysfakcji klienta z używanego produktu i reputacji przedsiębiorstwa, a w konsekwencji okresu przebywania produktu na rynku. Jednakże ograniczony budżet na badania i rozwój nowych produktów wymusza wyznaczenie optymalnej wartości pomiędzy R a C_{wi} , w celu uniknięcia sytuacji przeznaczenia znacznych nakładów finansowych na niewielką poprawę trwałości nowego produktu [1].

Przedsiębiorstwo dysponuje określonym budżetem na badania i rozwój nowych produktów B , który jest przeznaczony na badania rynkowe C_M i rozwinięcie portfela I najbardziej obiecujących produktów C_{Di} , co można wyrazić następująco:

$$C_M + \sum_{i=1}^I C_{Di} \leq B \quad (1)$$

Badania rynkowe mają na celu identyfikację potrzeb klientów, poziomu akceptacji dla nowego produktu przy proponowanej cenie czy też ocenę konkurencji. Rozwinięcie nowych produktów następuje również przy ograniczeniu osobowym dotyczącym liczby pracowników projektujących i testujących (TMT) i -ty produkt, która nie może być większa niż łączna liczba pracowników działu B+R (TM) w przyjętej jednostce czasu t , co można wyrazić jako:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T TMT_{i,t} \leq \sum_{t=1}^T TM_t \quad (2)$$

Na decyzję o wyborze portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia ma również wpływ koszt jednostkowy wytworzenia produktu c_{Ui} , który zależy między innymi od kosztu robocizny oraz ceny materiałów i technologii niezbędnych dla zapewnienia wymaganej niezawodności produktu. Cena sprzedaży nowego produktu jest ograniczona przez cenę produktów substytucyjnych p_i . Zbyt duży koszt materiałów czy technologii może wpływać na ograniczenie marży i -tego produktu m_i i nie zapewniać pożądanego zwrotu z inwestycji. Z tego powodu istotne jest wybranie takich projektów nowych produktów, które przy minimalnym koszcie zapewnienia należytej niezawodności produktu i napraw gwarancyjnych, będą miały minimalny koszt jednostkowy wytworzenia produktu, a tym samym maksymalną rentowność sprzedaży. Ograniczenie dotyczące kosztu jednostkowego wytworzenia i -tego produktu można zapisać następująco:

$$m_i \leq p_i - c_{Ui} \quad (3)$$

Wyszczególnienie w modelu opracowania nowego produktu zmiennych i ograniczeń, pozwala sformułować problem wyboru portfela projektów nowych produktów w postaci problemu spełniania ograniczeń (PSO), który można wyrazić następująco [4, 29]:

$$PSO = ((V, D), C) \quad (4)$$

gdzie:

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – skończony zbiór n zmiennych decyzyjnych,

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – zbiór dziedzin n zmiennych decyzyjnych,

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – skończony zbiór m ograniczeń wiążących zmienne decyzyjne i limitujących ich wartości.

Poszukiwane rozwiązanie PSO jest rozwiązaniem dopuszczalnym, w którym wartości wszystkich zmiennych spełniają wszystkie ograniczenia, bądź też rozwiązaniem optymalnym, w którym szukane jest ekstremum funkcji celu określonej na wybranym podziorze zmiennych decyzyjnych. Problem wyboru portfela projektów nowych produktów jest problemem optymalizacji wielokryterialnej, w którym wybór i -tego produktu do portfela projektów zależy od jednoczesnej minimalizacji:

1. kosztu opracowania nowego produktu C_{Di}
2. kosztu napraw gwarancyjnych C_{Wi}
3. kosztu jednostkowego wytworzenia produktu c_{Ui}

Rozwiązanie przedstawionego problemu sprowadza się do odpowiedzi na pytanie:

1) Czy przy przyjętych ograniczeniach można wyznaczyć portfel projektów nowych produktów, a jeżeli tak, to jakie projekty wchodzi w jego skład?

Odpowiedź na powyższe pytanie związane jest z estymacją kosztu opracowania nowego produktu, kosztu jednostkowego wytworzenia tego produktu oraz wyznaczeniem optymalnej wartości niezawodności produktu w stosunku do kosztu napraw gwarancyjnych.

W przypadku, gdy przyjęte ograniczenia uniemożliwiają otrzymanie portfela projektów nowych produktów lub otrzymane rozwiązanie nie jest satysfakcjonujące dla decydenta, wówczas można przeformułować problem szukając odpowiedzi na następujące pytanie:

2) Jakie wartości powinny mieć zmienne decyzyjne (np. liczba pracowników działu B+R, liczba czy koszt materiałów wymaganych do wytworzenia produktu), aby nie przekroczyć przyjętych ograniczeń (np. budżetu opracowania nowego produktu, kosztu jednostkowego wytworzenia produktu, wymaganej niezawodności produktu)?

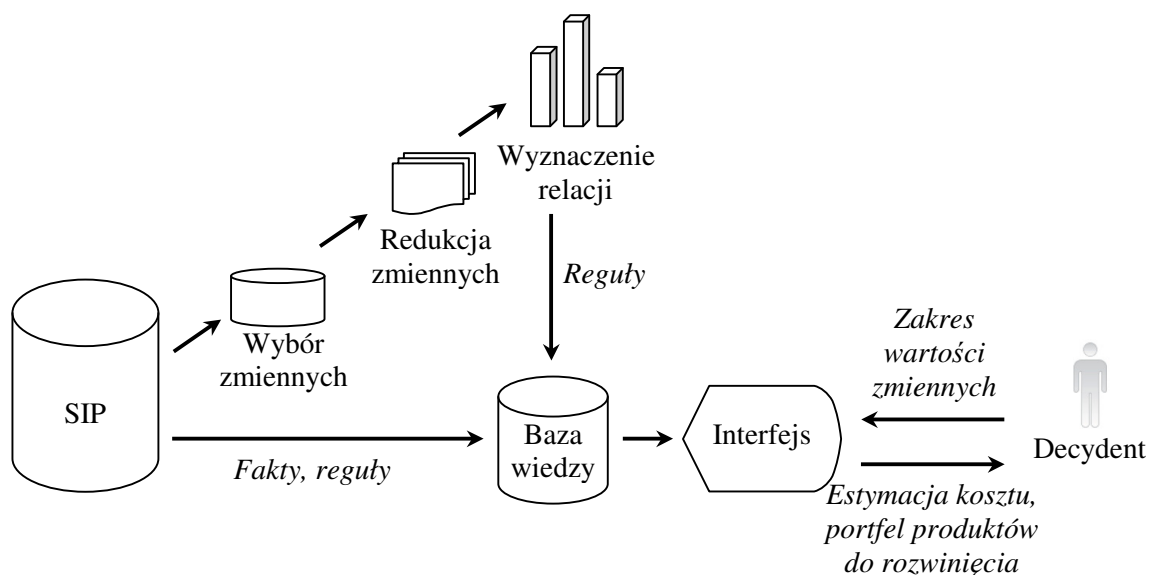
Przedstawione dwie klasy pytań odnoszą się odpowiednio do zadań prognozowania i diagnozowania. Pierwsza klasa zadań odnosi się do problemów, w których dla zadanych wartości wybranych zmiennych decyzyjnych wyznaczane są wartości wybranych funkcji celu. Natomiast druga klasa zadań odnosi się do problemów, w których dla zadanych wartości funkcji celu poszukiwane są alternatywne przedziały wartości arbitralnie wybranych zmiennych decyzyjnych. Obie klasy problemów w sposób naturalny można wyrazić w formalizmie PSO i rozwiązać z wykorzystaniem języków programowania z ograniczeniami [6].

3. Metoda budowy SWD dla wyboru portfela projektów nowych produktów

W przypadku opracowywania nowych produktów stanowiących modernizację już wytwarzanych produktów, do estymacji kosztu rozwinięcia nowego produktu można wykorzystać dane ze specyfikacji wcześniejszych projektów. Dane te są przechowywane w systemach informatycznych przedsiębiorstwa (SIP) takich jak ERP (*enterprise resource planning*) czy CAD (*computer-aided design*). Dostęp do danych gromadzonych w systemach

informatycznych przedsiębiorstwa umożliwia ich wykorzystanie do identyfikacji zmiennych objaśniających, które istotnie wpływają na zmienną objaśnianą (np. koszt rozwinięcia nowego produktu, koszt napraw gwarancyjnych). Kryterium wyboru zmiennej objaśniającej do modelu prognostycznego, oprócz istotnego wpływu na zmienną objaśnianą, jest również możliwość uzyskania wartości tych zmiennych na etapie planowania koncepcyjnego produktu. Następnie dla wybranego zbioru zmiennych objaśniających jest wykonywana analiza głównych składowych, w celu sprawdzenia możliwości redukcji liczby zmiennych i ostatecznie uniknięcia powielania się danych. Kolejny element proponowanej metody dotyczy wyznaczenia zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi a zmienną objaśnianą. Zależności te mogą być określane na przykład z wykorzystaniem modeli regresji liniowej lub metod uczenia maszynowego [26]. Wyznaczone relacje zapisane w postaci reguł warunkowych rozszerzają i/lub aktualizują bazę wiedzy, na podstawie której SWD wyznacza prognozę kosztu, portfel produktów do rozwinięcia oraz scenariusze symulacyjne dla zadanego zakresu wartości zmiennych wejściowych. Baza wiedzy oprócz relacji składa się również z faktów, na przykład poziomu zasobów występujących w przedsiębiorstwie.

Reguły zgromadzone w bazie wiedzy są podstawą estymacji kosztu po określeniu przewidywanych wartości zmiennych objaśniających dla rozważanych projektów nowych produktów. Otrzymane prognozy kosztu opracowania nowych produktów, ich wytworzenia i potencjalnych napraw gwarancyjnych są podstawą wyboru portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia. Wyznaczony optymalny portfel projektów nowych produktów jest prezentowany decydentowi, który może zmienić zakres wartości zmiennych wejściowych, aby sprawdzić alternatywne możliwości utworzenia portfela projektów przy spełnieniu zadanych ograniczeń. Rysunek 1 przedstawia strukturę systemu wspomaganie decyzji wykorzystywanego przy wyborze portfela projektów nowych produktów (WPPNP).



Rys. 1. Struktura systemu wspomaganie decyzji dla WPPNP

Problem spełniania ograniczeń może zostać wyrażony w postaci bazy wiedzy. Przyjmijmy, że baza wiedzy opisująca system jest reprezentowana jako zbiory U , W , Y , opisujące pewne własności systemu $U \in U$, $W \in W$, $Y \in Y$. U składa się ze zmiennych wejściowych, Y ze zmiennych wyjściowych, natomiast W ze zmiennych pomocniczych. Wiedza opisująca właściwości rozważanego systemu jest przedstawiana w postaci zbioru faktów $F(U, W, Y)$ i relacji (w tym ograniczeń) pomiędzy poszczególnymi zmiennymi U , W ,

Y . Przedstawione zbiory zmiennych wejściowych, wyjściowych i pomocniczych można wyrazić odpowiednio jako $U = \{u_1, \dots, u_j\}$, $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$, $W = \{w_1, \dots, w_l\}$, gdzie $U = Du_1 \times Du_2 \times \dots \times Du_j$, $Y = Dy_1 \times Dy_2 \times \dots \times Dy_k$, $W = Dw_1 \times Dw_2 \times \dots \times Dw_l$, a $F(U)$ i $F(Y)$ są zbiorami ograniczeń, łączącymi zmienne z różnych domen. Rozważany problem dotyczy znalezienia takiego $R \subset U \times W \times Y$, które implikuje $F(U) \rightarrow F(Y)$ [3].

Struktura bazy wiedzy może zostać opisana z wykorzystaniem metody algebraiczno-logicznej, której formalizm w kontekście zarządzania portfelem projektów został przedstawiony w [3]. Metoda algebraiczno-logiczna pozwala zaimplementować rozważany problem w środowisku programowania w logice z ograniczeniami (*constraint logic programming* – CLP). CLP jest platformą do rozwiązywania problemów kombinatorycznych określonych przez zbiór zmiennych i powiązanych z nimi dziedzin oraz zbiór ograniczeń limitujących możliwe kombinacje wartości zmiennych. Istotną cechą ograniczeń stanowi ich deklaratywny charakter. Deklaratywność oznacza, że odpowiedni opis rozwiązywanego problemu, jest zarazem programem rozwiązującym ten problem [24, 29]. W poszukiwaniu rozwiązania PSO wykorzystywane są metody podziału i ograniczeń bazujące na heurystycznych funkcjach oceny przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. Metody te są dostępne w środowisku CLP, np. w platformach programistycznych CHIP, ILOG czy Oz Mozart [6].

4. Przykład

Celem przykładu jest przedstawienie możliwości wykorzystania systemu rozmyto-neuronowego do identyfikacji zależności pomiędzy zmiennymi i specyfikacji tych zależności w postaci reguł warunkowych, jak również technik programowania w logice z ograniczeniami do wyznaczenia alternatywnych portfeli projektów rozwoju nowych produktów. Przykład składa się z dwóch części nawiązujących do problemów (pytań) przedstawionych w ramach modelu wyboru portfela nowych produktów (por. rozdział 2). Pierwsza część dotyczy estymacji kosztu rozwinięcia produktu (podrozdział 4.1) oraz estymacji niezawodności produktu i kosztu napraw gwarancyjnych (podrozdział 4.2), w celu wyznaczenia portfela produktów do rozwinięcia (podrozdział 4.3). Druga część przedstawia wykorzystanie środowiska programistycznego CLP do poszukiwania zbioru takich wartości zmiennych wejściowych, przy których zadane ograniczenia są spełnione (podrozdział 4.4).

4.1. Estymacja kosztu opracowania nowego produktu

W celu uwzględnienia różnic występujących w zakresie prac rozwojowych dla danego projektu nowego produktu, zaproponowano następujący model prognostyczny:

$$C_D = f(V_1, V_2, V_3) \quad (5)$$

gdzie: C_D – koszt opracowania nowego produktu, V_1 – liczba elementów w nowym produkcie, V_2 – liczba nowych elementów w produkcie, V_3 – liczba pracowników uczestniczących w projektowaniu, budowie i testowaniu nowego produktu.

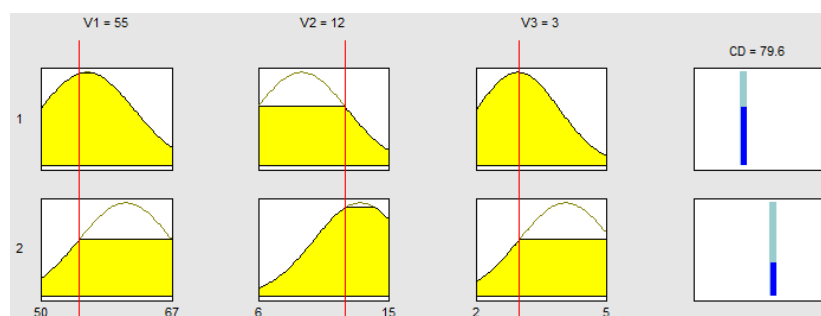
Zbiór danych obejmuje 38 zakończonych projektów dotyczących tej samej linii produktów co rozważane nowe projekty do rozwinięcia. W celu określenia jakości prognozowania danego modelu, ze zbioru danych wyodrębniono zbiór uczący (30 projektów) i zbiór testowy (8 projektów). Estymację kosztu opracowania nowego produktu przeprowadzono z wykorzystaniem średniej arytmetycznej, regresji liniowej i systemu rozmyto-neuronowego (*adaptive neuro-fuzzy inference system* – ANFIS). System rozmyto-neuronowy łączy w sobie zalety sztucznych sieci neuronowych (możliwość uczenia i identyfikacji złożonych zależności) i logiki rozmytej (możliwość inkorporacji wiedzy

eksperta i wyrażenia zidentyfikowanych zależności w postaci reguł warunkowych *if-then*) [17, 18, 26]. Metodę uczenia systemu rozmyto-neuronowego oraz parametry procesu uczenia dobrano w sposób eksperymentalny, porównując błędy generowane przez metodę *grid partition* oraz *subtractive clustering* zaimplementowane w środowisku Matlab®. Dla przyjętego zbioru danych błędy o mniejszych wartościach zostały wygenerowane z wykorzystaniem metody *subtractive clustering* z parametrami o następujących wartościach: *squash factor* – 1.25, *accept ratio* – 0.5, *reject ratio* – 0.15 oraz *range of influence* (RI) od 0.1 do 1.5. Tabela 1 przedstawia błąd średniokwadratowy (*root mean square error* – RMSE) dla zbioru uczącego i testowego oraz liczbę reguł otrzymaną z wykorzystaniem ANFIS, regresji liniowej oraz średniej.

Tabela 1. RMSE oraz liczba reguł dla estymacji kosztu opracowania produktu

Model	RMSE w zbiorze uczącym	RMSE w zbiorze testowym	Liczba reguł
ANFIS, RI = 0.1	1.456	2.396	24
ANFIS, RI = 0.2	1.456	4.725	11
ANFIS, RI = 0.3	1.473	15.572	6
ANFIS, RI = 0.4	1.462	9.937	6
ANFIS, RI = 0.5	1.478	6.600	4
ANFIS, RI = 0.6	1.599	2.193	3
ANFIS, RI = 0.7	1.599	2.187	3
ANFIS, RI = 0.8	1.599	2.159	3
ANFIS, RI = 0.9	1.616	2.120	2
ANFIS, RI = 1	1.617	2.111	2
ANFIS, RI = 1.5	1.626	2.148	2
Regresja liniowa	2.982	3.096	1
Średnia	15.429	21.817	1

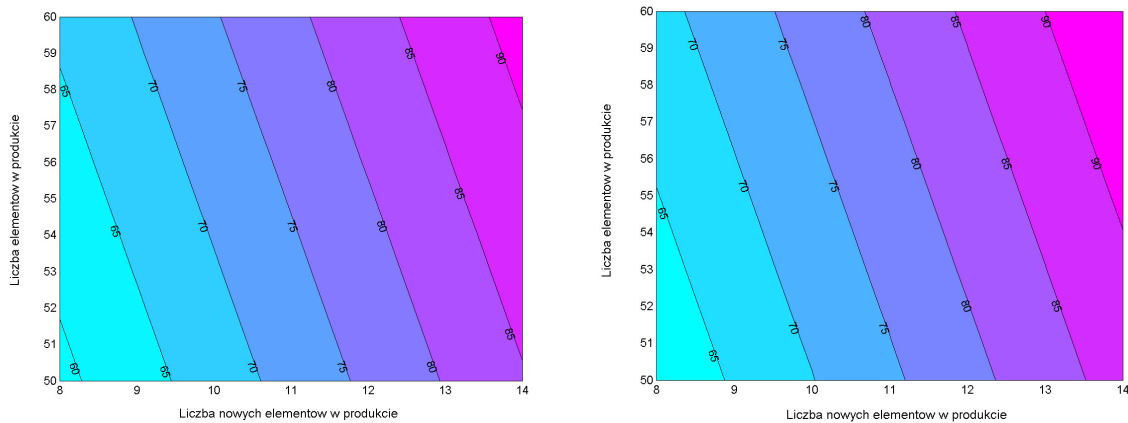
System rozmyto-neuronowy wygenerował w zbiorze uczącym mniejsze wartości błędu RMSE niż średnia arytmetyczna i model regresji liniowej. Jednakże w zbiorze testowym wartość błędu RMSE dla ANFIS i parametru RI w zakresie od 0.2 do 0.5 przewyższała RMSE otrzymane z wykorzystaniem regresji liniowej. Najmniejsze wartości błędu RMSE oraz niewielką liczbę reguł uzyskano z wykorzystaniem ANFIS dla parametru RI w zakresie od 0.6 do 1.5. Rysunek 2 przedstawia wykorzystanie ANFIS (dla RI = 1) do estymacji kosztu opracowania nowego produktu C_D , przy następujących wartościach zmiennych wejściowych: $V_1 = 55$, $V_2 = 12$, $V_3 = 3$.



Rys. 2. Estymacja kosztu opracowania nowego produktu z wykorzystaniem ANFIS

Prognoza punktowa kosztu opracowania nowego produktu (79.6 tys. euro) może zostać następnie rozszerzona w kierunku prognozy przedziałowej, aby sprawdzić wrażliwość

zmiany kosztu dla zadanego zakresu zmiennych wejściowych. Rysunek 3 przedstawia estymację kosztu opracowania nowego produktu przy liczbie elementów w nowym produkcie w zakresie od 50 do 60, liczbie nowych elementów w produkcie od 8 do 14 oraz 3 pracownikach (wykres po lewej) i 4 pracownikach (wykres po prawej).



Rys. 3. Koszt opracowania nowego produktu w zależności od zmian V_1 , V_2 , V_3

Na rysunku 3 można zauważyć siłę i kierunek zmian kosztu opracowania nowego produktu w zależności od zmian V_1 , V_2 , V_3 . Wzrost liczby elementów w nowym produkcie powoduje wzrost kosztu opracowania nowego produktu średnio o 0.7 tys. euro, natomiast każdy nowy element w produkcie powoduje wzrost kosztu opracowania nowego produktu średnio o 4.3 tys. euro. Ponadto, przeprowadzona analiza wykazała, że dodatkowy pracownik zaangażowany w projektowanie i testowanie nowego produktu powoduje wzrost kosztu opracowania nowego produktu średnio o 2.4 tys. euro. Tego rodzaju analiza jest przeprowadzana dla każdego potencjalnego produktu, wskazując siłę zmiany kosztu opracowania nowego produktu w zależności od zmiany wartości zmiennych wejściowych.

4.2. Estymacja niezawodności produktu i kosztu napraw gwarancyjnych

Kolejnym kryterium wyboru portfela projektów do rozwinięcia jest koszt napraw gwarancyjnych, który obejmuje rozpatrzenie reklamacji, naprawę wadliwego produktu czy jego wymianę na nowy. Niezawodność produktu jest mierzona jako średnia liczba cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia, natomiast koszt napraw gwarancyjnych jest mierzony jako średni koszt przypadający na 1 000 sprzedanych produktów z danej linii w pierwszych 24 miesiącach od daty sprzedaży. Wyznaczenie zależności pomiędzy niezawodnością produktu a kosztem napraw gwarancyjnych pozwala ustalić optymalną wartość inwestowania w zwiększenie niezawodności produktu.

W celu estymacji niezawodności nowego produktu zaproponowano następujący model prognostyczny:

$$R = f(V_1, V_2, V_4, V_5) \quad (6)$$

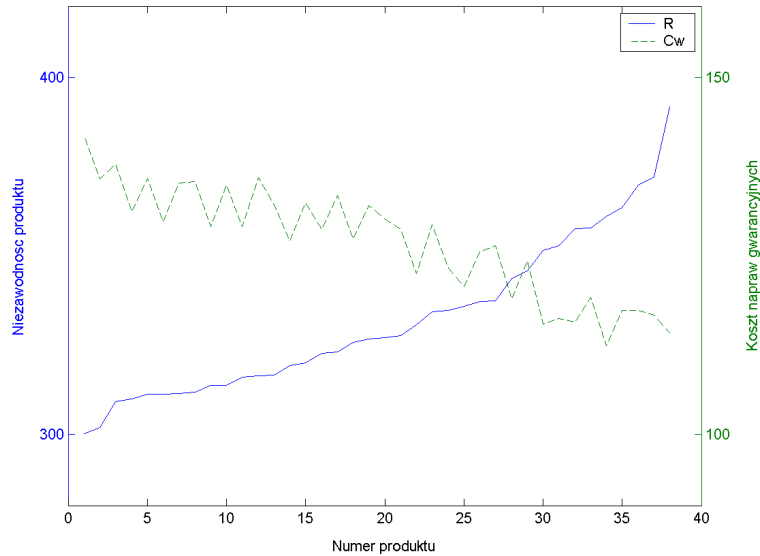
gdzie: R – niezawodność produktu, V_1 – liczba elementów w nowym produkcie, V_2 – liczba nowych elementów w produkcie, V_4 – liczba materiałów w nowym produkcie, V_5 – koszt wymaganych materiałów. Tabela 2 przedstawia liczbę reguł oraz błąd RMSE otrzymany z wykorzystaniem ANFIS, regresji liniowej oraz średniej.

Tabela 2. RMSE oraz liczba reguł dla estymacji niezawodności produktu

Model	RMSE w zbiorze uczącym	RMSE w zbiorze testowym	Liczba reguł
ANFIS, RI = 0.1	0.053	3.574	30
ANFIS, RI = 0.2	0.079	3.655	26
ANFIS, RI = 0.3	0.062	3.981	18
ANFIS, RI = 0.4	0.061	4.625	12
ANFIS, RI = 0.5	0.043	10.912	10
ANFIS, RI = 0.6	0.031	5.558	9
ANFIS, RI = 0.7	0.138	4.597	7
ANFIS, RI = 0.8	1.154	10.614	5
ANFIS, RI = 0.9	1.587	2.722	4
ANFIS, RI = 1	2.216	2.844	3
ANFIS, RI = 1.5	2.554	2.956	2
Regresja liniowa	9.657	8.047	1
Średnia	21.412	22.464	1

Parametry budowy i uczenia systemu rozmyto-neuronowego przyjęto takie same jak w podrozdziale 4.1. Najmniejszy błąd RMSE w zbiorze testowym otrzymano dla ANFIS, w którym parametr RI równał się 0.9. W dwóch przypadkach (dla RI=0.5 i RI=0.8) RMSE w zbiorze testowym wygenerowany przez ANFIS był większy niż dla modelu regresji liniowej. Wskazuje to na konieczność porównywania wyników otrzymywanych przez ANFIS dla różnych parametrów jego budowy i uczenia, co jest niewątpliwie wadą stosowania tego rodzaju struktur. Jednakże precyzyjniejsza estymacja kosztu przy niewielkiej liczbie reguł (dla RI od 0.9 do 1.5) wskazuje na atrakcyjność wykorzystania tego narzędzia do budowy/aktualizacji bazy wiedzy.

W kolejnym etapie wyznaczana jest zależność pomiędzy średnią liczbą cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia a kosztem napraw gwarancyjnych. W przypadku istnienia istotnej zależności pomiędzy tymi zmiennymi (wartość bezwzględna współczynnika korelacji większa od 0.8), wyznaczana jest przewidywana wartość kosztu napraw gwarancyjnych na etapie wyboru portfela projektów do rozwinięcia. Rysunek 4 przedstawia średnią liczbę cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia R (lewa oś rzędnych, linia ciągła) oraz koszt napraw gwarancyjnych C_W (prawa oś rzędnych, linia przerywana) dla 38 dotychczasowych produktów (oś odciętych). W celu zaobserwowania zależności pomiędzy tymi zmiennymi, liczba cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia została posortowana rosnąco. Wartość współczynnika korelacji wynosi -0.908 , co wskazuje na silną zależność pomiędzy wzrostem liczby cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia a spadkiem kosztu napraw gwarancyjnych. Przeprowadzona analiza wykazała, że poprawa niezawodności powyżej liczby 390 cykli użycia produktu do wystąpienia pierwszego uszkodzenia nie przekłada się na istotny spadek kosztu napraw gwarancyjnych.



Rys. 4. Niezawodność produktu a koszt napraw gwarancyjnych

Dane dotyczące nowego produktu (liczba elementów, liczba i cena materiałów) są również podstawą oszacowania jednostkowego kosztu produkcji, który oprócz kosztu opracowania nowego produktu i kosztu napraw gwarancyjnych jest kryterium wyboru portfela produktów do rozwinięcia.

4.3. Wybór portfela produktów do rozwinięcia

W przypadku ograniczeń finansowych związanych z budżetem na badania i rozwój nowych produktów czy też kadrowych dotyczących wymaganych specjalistów, przedsiębiorstwo jest zmuszone wybrać do wdrożenia tylko najbardziej obiecujące produkty. Przyjmując założenie, że wielkość sprzedaży produktów z tej samej linii jest podobna, kryterium decydującym o wyborze portfela produktów jest koszt ich opracowania C_D , produkcji c_U i potencjalnych napraw gwarancyjnych C_W . Koszt opracowania nowych produktów oraz napraw gwarancyjnych jest wyrażony w innej jednostce niż koszt jednostkowy produkcji. W celu doprowadzenia do porównywalności ocen względem różnych kryteriów, znormalizowano wartości kosztu C_D , c_U i C_W .

Rozważane jest 11 projektów rozwoju nowych produktów, dla których określono wartości zmiennych wejściowych V_1 - V_5 oraz czas trwania danego projektu T . Na podstawie tych wartości wyznaczono średnią liczbę cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia R oraz koszt opracowania nowego produktu, jego produkcji i potencjalnych napraw gwarancyjnych. Tabela 3 przedstawia wartości zmiennych oraz kryteriów potrzebnych do określenia portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia.

Tabela 3. Dane do określenia portfela projektów

Projekt \ Zmienna	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
V_1	52	57	61	49	55	52	57	51	59	53	50
V_2	8	11	12	8	9	7	10	7	12	8	8
V_3	2	3	4	2	3	3	3	3	4	3	2
V_4	9	10	11	9	10	9	10	10	11	9	10
V_5	220	254	281	221	246	219	251	237	280	223	238

T	93	78	64	91	68	57	74	57	63	63	91
R	347	317	314	350	336	365	325	368	314	348	350
C_D	61	80	90	59	70	60	76	59	89	65	60
C_W	122	132	133	121	126	116	129	115	133	122	121
c_U	341	394	436	343	382	339	389	368	434	345	369

Na opracowanie nowych produktów przewidziano budżet 120 tys. euro, 150 dni roboczych i 6 pracowników działu B+R. Dodatkowe ograniczenia dotyczyły minimalnej niezawodności produktu ustalonej na 350 cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia i maksymalnej wartości kosztu jednostkowego produkcji wynoszącej 400 euro. Ponadto portfel projektów powinien zawierać co najmniej dwa nowe produkty do rozwinięcia. Dla powyższych danych i przyjętych ograniczeń uzyskano 5 rozwiązań dopuszczalnych, spośród których rozwiązaniem optymalnym jest opracowanie projektu P4 i P6. Koszt opracowania tego portfela projektów został oszacowany na 119 tys. euro w terminie realizacji przewidzianym na 148 dni roboczych.

W przypadku braku rozwiązania lub gdy otrzymane rozwiązanie nie jest satysfakcjonujące dla decydenta, rozważany problem można przeformułować szukając odpowiedzi na następujące pytanie: jakie wartości powinny mieć zmienne wejściowe, aby spełnić przyjęte ograniczenia? Wówczas zbiór rozwiązań dopuszczalnych szukany jest z wykorzystaniem metod dostępnych w środowisku programistycznym CLP.

4.4. Wyznaczanie rozwiązań dopuszczalnych dla zadanej niezawodności produktu

Średnia liczba cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia dla rozważanych projektów jest w zakresie od 314 do 368 (zmienna R w tabeli 3). Jeżeli wartości te nie odpowiadają polityce zapewnienia wymaganej niezawodności produktu, wówczas proponowane podejście identyfikuje zbiór wartości zmiennych wejściowych (jeżeli taki istnieje), przy którym możliwe jest osiągnięcie wymaganej niezawodności produktu.

Rozważane jest zwiększenie wymaganej niezawodności produktu powyżej 370 cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia. Szukana jest odpowiedź na pytanie: czy zmiana liczby nowych elementów w produkcie (V_2) i/lub liczby materiałów do wytworzenia nowego produktu (V_4) maksymalnie o 2 sztuki zwiększy wymaganą niezawodność produktu powyżej 370 cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia, przy jednoczesnym spełnieniu pozostałych ograniczeń (kosztowych, czasowych i kadrowych). Do identyfikacji zbioru rozwiązań dopuszczalnych wykorzystano środowisko programistyczne Oz Mozart, pozwalające wykorzystać ideę i metody programowania w logice z ograniczeniami.

Wykorzystanie metod programowania w logice z ograniczeniami umożliwia przedstawienie problemu w postaci deklaratywnej, co w połączeniu z technikami propagacji ograniczeń i dystrybucji zmiennych pozwala na znaczne zredukowanie przeszukiwanego zbioru potencjalnych rozwiązań i w konsekwencji przyspiesza uzyskanie rozwiązania. W tabeli 4 przedstawiono liczbę rozwiązań dopuszczalnych dla różnych wariantów zmian w V_2 i V_4 , a także optymalny portfel projektów nowych produktów wraz z przewidywaną liczbą cykli użycia danego produktu do pierwszego uszkodzenia.

Tabela 4. Liczba rozwiązań dopuszczalnych dla różnych wariantów portfela projektów

Wariant	Liczba rozwiązań dopuszczalnych	Optymalny portfel projektów
V_2 zmniejszenie o 1, V_4 bez zmian	1	P6 ($R = 389$), P8 ($R = 391$)
V_2 zmniejszenie o 1, V_4 zwiększenie o 1	3	P6 ($R = 391$), P8 ($R = 395$)

V_2 zmniejszenie o 1, V_4 zwiększenie o 2	6	P4 ($R = 371$), P6 ($R = 394$)
V_2 zmniejszenie o 2, V_4 bez zmian	15	P6 ($R = 422$), P8 ($R = 425$)
V_2 zmniejszenie o 2, V_4 zwiększenie o 1	15	P6 ($R = 424$), P8 ($R = 428$)
V_2 zmniejszenie o 2, V_4 zwiększenie o 2	6	P4 ($R = 395$), P6 ($R = 428$)

Dla rozważanego problemu zwiększenie średniej liczby cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia nastąpiło wraz ze zmniejszeniem liczby nowych elementów w produkcji i/lub zwiększeniem liczby wykorzystanych materiałów. Tego typu analiza umożliwia określenie wartości zmiennych wejściowych (parametrów projektu), które zapewniają uzyskanie wymaganej wartości kryterium decyzyjnego (w rozważanym przypadku jest to wymagana średnia liczba cykli użycia produktu do pierwszego uszkodzenia). Przedstawione podejście wskazuje kierunki potencjalnych zmian zapewniających spełnienie przyjętych ograniczeń, a w konsekwencji umożliwia optymalny wybór portfela nowych produktów do rozwinięcia.

5. Podsumowanie

Wybór portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia jest jedną z ważniejszych decyzji podejmowanych w przedsiębiorstwie, wpływając w znacznym stopniu na przyszłą wielkość zysków i rozwój firmy. Obserwowane ostatnio skrócenie cyklu życia produktów powoduje konieczność systematycznego rozwoju nowych produktów i ich umieszczania na rynku, aby podtrzymać konkurencyjność przedsiębiorstwa. W tej sytuacji jeszcze większego znaczenia nabiera decyzja o wyborze portfela najbardziej obiecujących projektów nowych produktów. Decyzja ta jest podejmowana w oparciu o wiele kryteriów, często sprzecznych ze sobą i z uwzględnieniem zasobów dostępnych w przedsiębiorstwie. Przykładem sprzecznych kryteriów jest zwiększenie niezawodności produktu przy jednoczesnym ograniczeniu kosztu jednostkowego wytworzenia produktu. Istotnym wydaje się więc wsparcie decydenta przy wyborze portfela projektów nowych produktów do rozwinięcia.

Wybór portfela projektów uzależniony jest od dostępnych w przedsiębiorstwie zasobów i bazuje na przewidywanej wartości kosztu i czasu realizacji projektu nowego produktu oraz jego sukcesu rynkowego. Sukces ten w decydującym stopniu zależy od satysfakcji klienta związanej z ceną produktu, jego funkcjami, ale przede wszystkim z niezawodnością produktu. Oryginalność proponowanego podejścia obejmuje włączenie aspektu niezawodności produktu do problemu wyboru portfela projektów nowych produktów. W ujęciu systemowym niezawodność produktu nie tylko redukuje koszt potencjalnych napraw gwarancyjnych, lecz przede wszystkim zwiększa satysfakcję klienta z używanego produktu, co w konsekwencji umożliwia wzrost reputacji przedsiębiorstwa, sprzedaży i zysków. Do cech proponowanego podejścia można zaliczyć wykorzystanie specyfikacji projektowej wcześniejszych produktów do identyfikacji zależności pomiędzy atrybutami produktu a kosztem i czasem realizacji projektu czy nakładami na zapewnienie zadanej niezawodności produktu a kosztami napraw gwarancyjnych. Zależności te są podstawą oszacowania wartości kryteriów wykorzystywanych do wyboru portfela projektów nowych produktów. Ponadto, proponowane podejście charakteryzuje się wyrażeniem zagadnienia wyboru portfela projektów w postaci problemu spełniania ograniczeń oraz wykorzystaniem technik programowania w logice z ograniczeniami do uzyskania rozwiązania tego problemu.

Zapis problemu w postaci zmiennych, ich domen oraz ograniczeń wiążących i limitujących te zmienne umożliwia wykorzystanie metody algebraiczno-logicznej do opisanie struktury bazy wiedzy i ułatwia jej rozbudowę czy aktualizację. Natomiast wykorzystanie technik programowania w logice z ograniczeniami pozwala przyspieszyć proces wyszukiwania rozwiązania.

Do ograniczeń przedstawionego podejścia można zaliczyć wymagania związane z pozyskaniem odpowiednio licznego zbioru danych (specyfikacji wcześniejszych projektów nowych produktów należących do tej samej linii) do estymacji kosztu opracowania nowego produktu czy kosztu napraw gwarancyjnych. Ponadto, proces budowy i doboru parametrów uczenia struktury rozmyto-neuronowej jest przeprowadzany w sposób eksperymentalny, co można traktować jako ograniczenie w porównaniu do budowy modeli regresji liniowej.

Literatura

1. Ahmed H, Chateaneuf A. Optimal number of tests to achieve and validate product reliability. *Reliability Engineering and System Safety* 2014; 131: 242-250.
2. Anderson D M. *Design for manufacturability*. London: CRC Press, 2014.
3. Bach I, Bocewicz G, Banaszak Z, Muszyński W. Knowledge based and CP-driven approach applied to multi product small-size production flow. *Control and Cybernetics* 2010; 39 (1): 69-95.
4. Banaszak Z, Zaremba M, Muszyński W. Constraint programming for project-driven manufacturing. *International Journal of Production Economics* 2009; 120: 463-475.
5. Ben-Arieh D, Qian L. Activity-based cost management for design and development stage. *International Journal of Production Economics* 2003; 83: 169-183.
6. Bocewicz G. Robustness of multimodal transportation networks. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (2): 259-269.
7. Booker J D, Rainer M, Swift K G. *Designing capable and reliable products*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
8. Chan S L, Ip W H. A dynamic decision support system to predict the value of customer for new product development. *Decision Support Systems* 2011; 52: 178-188.
9. Chatterjee S, Bandopadhyay S. Reliability estimation using a genetic algorithm-based artificial neural network: an application to a load-haul-dump machine. *Expert Systems with Applications* 2012; 39: 10943-10951.
10. Chin K S, Chan A, Yang J B. Development of a fuzzy FMEA based product design system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2008; 36: 633-649.
11. Cooper R, Edgett S. Maximizing productivity in product innovation. *Research Technology Management* 2008; 51 (2): 47-58.
12. Dieter G E. *Engineering design: a material and processing approach*. Boston: McGraw-Hill, 2000.
13. Du X, Jiao J, Tseng M M. Understanding customer satisfaction in product customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2006; 31: 396-406.
14. Foussier P. *From product description to cost: a practical approach*. London: Springer, 2006.
15. Hvam L, Mortensen N H, Riis J. *Product customization*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
16. Juran J M, Gryna F M. *Quality planning and analysis: from product development through use*. McGraw-Hill Science, 2000.

17. Kłosowski G, Gola A, Świć A. Application of fuzzy logic controller for machine load balancing in discrete manufacturing system. *Lecture Notes in Computer Science* 2015; 9375: 256-263.
18. Kłosowski G, Gola A, Świć A. Application of fuzzy logic in assigning workers to production tasks. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 2016; 474: 505-513.
19. Kumar S. A knowledge based reliability engineering approach to manage product safety and recalls. *Expert Systems with Applications* 2014; 41: 5323-5339.
20. Levin M, Kalal T. *Improving product reliability: strategies and implementation*. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.
21. Lolas S, Olatunbosun O A. Prediction of vehicle reliability performance using artificial neural networks. *Expert Systems with Applications* 2008; 34: 2360-2369.
22. Murthy D N, Rausand M, Osteras T. *Product reliability: specification and performance*. London: Springer, 2008.
23. Niazi A, Dai J, Balabani S, Seneviratne L. Product cost estimation: technique classification and methodology review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2005; 128: 563-575.
24. Niederliński A. *A gentle guide to constraint logic programming via ECLiPSe*. Gliwice: PKJS, 2011.
25. Peng W, Huang H Z, Li Y, Zuo M, Xie M. Life cycle reliability assessment of new product – a Bayesian model updating approach. *Reliability Engineering and System Safety* 2013; 112: 109-119.
26. Relich M. A computational intelligence approach to predicting new product success. *Proceedings of the 11th International Conference on Strategic Management and its Support by Information Systems*, 2015, 142-150.
27. Relich M, Pawlewski P. A multi-agent system for selecting portfolio of new product development project. *Communications in Computer and Information Science* 2015; 524: 102-114.
28. Relich M. Identifying relationships between eco-innovation and product success. *Technology Management for Sustainable Production and Logistics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2015, 173-192.
29. Rossi F, van Beek P, Walsh T. *Handbook of constraint programming*. Elsevier, 2006.
30. Salazar D, Rocco C M, Galvan B J. Optimization of constrained multiple-objective reliability problems using evolutionary algorithms. *Reliability Engineering and System Safety* 2006; 91: 1057-1070.
31. Trott P. *Innovation management and new product development*. Essex: Prentice Hall, 2005.
32. Ulrich K, Eppinger S. *Product design and development*. Boston: McGraw-Hill, 2011.
33. Xu K, Xie M, Tang L C, Ho S L. Application of neural networks in forecasting engine systems reliability. *Applied Soft Computing* 2003; 2: 255-268.
34. Yadav O P, Singh N, Chinnam R B, Goel P S. A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development. *Reliability Engineering and System Safety* 2003; 80: 63-74.
35. Zafiropoulos E P, Dialynas E N. Reliability prediction and failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of electronic devices using fuzzy logic. *International Journal of Quality & Reliability Management* 2005; 22: 183-200.