



Ewa Chodakowska

Hybrydowy model priorytetyzacji technologii

Ewa Chodakowska

Hybrydowy model priorytetyzacji technologii



Ofcyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Białystok 2019

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Cezary Orłowski
dr hab. inż. Roman Szewczyk, prof. PW

Redaktor wydawnictwa:

Elżbieta Dorota Alicka

Projekt okładki:

Agencja Wydawnicza EkoPress
wykorzystano grafikę bennymarty

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2019

ISBN 978-83-65596-90-1

ISBN 978-83-65596-91-8 (eBook)

DOI: 10.24427/978-83-65596-91-8



Publikacja jest udostępniona na licencji

Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0)

Pełna treść licencji dostępna na stronie

creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl

Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB

Redakcja techniczna, skład:

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Druk:

EXDRUK Spółka Cywilna

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej

ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

tel.: 85 746 91 37

e-mail: oficina.wydawnicza@pb.edu.pl

www.pb.edu.pl

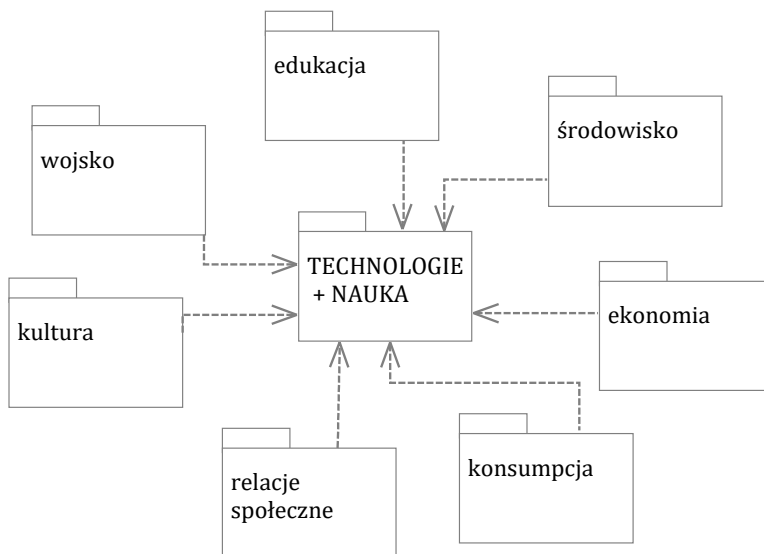
Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Priorytetyzacja technologii – definicje, istota i metody	15
1.1. Technologia – objaśnienie pojęć kluczowych.....	15
1.2. Zbiory przybliżone i metoda <i>Data Envelopment Analysis</i> w ocenie technologii – przegląd literatury	25
1.3. Priorytetyzacja w metodach analizy technologii.....	38
2. Teoretyczne podstawy hybrydowego modelu	59
2.1. Wprowadzenie do zbiorów przybliżonych.....	59
2.2. Podstawy <i>Data Envelopment Analysis</i>	72
3. Hybrydowy model priorytetyzacji technologii	87
3.1. Koncepcja i wzory hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii	87
3.2. Hybrydowy model priorytetyzacji w procesie oceny technologii.....	98
4. Weryfikacja hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii na podstawie «NT FOR Podlaskie 2020»	111
Podsumowanie	159
Streszczenie	165
Summary	167
Bibliografia	169
Spis tabel	207
Spis rysunków	209
Załączniki	211
Załącznik 1. Wartości kryteriów wykonalności (dane odwrócone, dane nieważone)	211
Załącznik 2. Wartości kryteriów atrakcyjności (dane nieważone)	213
Załącznik 3. Wartości kryteriów wykonalności (dane odwrócone, dane ważne)	215
Załącznik 4. Wartości kryteriów atrakcyjności (dane ważne).....	217

Wprowadzenie

Technologie zawsze pełniły rolę napędową i transformacyjną. Rewolucja przemysłowa w XVIII wieku zmieniła strukturę społeczną, ale też międzynarodowy układ sił. Rewolucja naukowo-techniczna rozpoczęta w XX wieku, obejmująca między innymi równoległy rozwój elektroniki, telekomunikacji, robotyki, biotechnologii, nanotechnologii, informatyzacji czy cyfryzacji, była również podstawą zmian zachodzących w gospodarkach, rewizji dotychczasowej pozycji państw, organizacji i przedsiębiorstw, ale też transformacji relacji społecznych¹.

Technologie oddziałują na wszystkie sfery działalności człowieka. Zmiany, jakie wywołała rozpoczęta w XXI wieku czwarta rewolucja przemysłowa (niem. *Industrie 4.0*), wykraczają daleko poza sferę gospodarki. Wśród obszarów wpływu technologii, za L. Zacherem², można wymienić: konsumpcję, edukację, życie społeczne, kulturę, środowisko, obronność, ekonomię. Zależności zostały schematycznie przedstawione za pomocą diagramu pakietów zunifikowanego języka modelowania (ang. *unified modeling language* – UML) na rysunku.



Rysunek. Technologie i wybrane obszary ludzkiej aktywności

Źródło: opracowanie własne na podstawie: L. Zacher, *Technology...*, op. cit.

¹ L. Zacher (2016), *Technology and a New International Distribution of Power*, w: M. Szkarłat, K. Mojska (red.), *New Technologies as a Factor of International Relations*, Cambridge Scholars Publishing, s. 35–52; C. Perez (2002), *Technological Revolutions and Financial Capital*, Edward Elgar Publishing, s. 4.

² L. Zacher, *Technology...*, op. cit., s. 49.

Współcześnie wszechogarniające znaczenie technologii jest w zasadzie bezdyskusyjne. Technologie odgrywają kluczową rolę zarówno na poziomie przedsiębiorstw, będąc podstawą budowania długookresowej przewagi konkurencyjnej, ale też gospodarki i społeczeństwa jako główna determinanta zrównoważonego rozwoju. Konsekwencją uznania wagi technologii, a także konieczności ukierunkowywania i kontrolowania jej rozwoju było opracowanie różnorodnych metod, modeli i narzędzi jej analizy i oceny.

Na potrzeby monografii przyjęto następujące klasyczne rozróżnienie stosowanych w tekście pojęć:

metoda – (gr. *méthodos*, sposób badania) – procedura, układ etapów postępowania, systemowy sposób osiągnięcia lub zbliżenia się do określonego celu, rozwiązania problemu³;

model – (łac. *modulus*, miara, wzór) – konstrukcja, matematyczna reprezentacja, układ przyjmowanych założeń w celu uproszczenia, ułatwienia lub umożliwienia rozwiązania zadania⁴;

narzędzie – obiekt wykonujący daną funkcję, służący określonym celom⁵.

Metody oceny technologii są rozwijane już od lat sześćdziesiątych XX wieku⁶, jednak problematyka ta ma szczególne znaczenie obecnie, gdy szybkość zmian technologicznych i wynikająca z niej niepewność stawiają w zarządzaniu technologiami nowe wyzwania. Czwarta rewolucja przemysłowa to systemy cyberfizyczne, Internet Rzeczy, Internet Usług oraz inteligentne fabryki. Ryzyko podjęcia nietrafnej technologicznej decyzji inwestycyjnej ze względu na złożoność systemów technologicznych, ich wzajemne powiązania i nieustanną ewolucję jest bardzo wysokie. Z drugiej strony, właściwe decyzje strategiczne w tym obszarze zwiększają szanse na osiągnięcie znacznej przewagi konkurencyjnej i wynikających z niej korzyści ekonomicznych, ale też i społecznych. W dobie rewolucji technologicznej śledzenie trendów i obserwacja nowych zjawisk często nie są wystarczające. Odpowiedzią na wyzwania współczesności jest aktywne i kompleksowe zarządzanie technologiami.

Prowadzone intensywne prace nad rozwiązaniem problemu oceny technologii przełożyły się na rozwój metodologii prowadzenia projektów oceny i opracowanie licznych metodyk. Obszerny zbiór metod możliwych do wykorzysta-

³ A. Bronk (2006), *Metoda naukowa*, „Nauka” 1, 47–64, http://www.pan.poznan.pl/nauki-/N_106_03_Bronk.pdf [27.01.2019]; W. Czakon (red.) (2015), *Podstawy metodologii badań w naukach o zarządzaniu*, Wolters Kluwer business, Warszawa, s. 11.

⁴ Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/index.php/Model> [27.01.2019]; R. Frigg, S. Hartmann (2018), *Models in Science*, w: E.N. Zalta (red.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2018 Edition), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/> [27.01.2019].

⁵ Encyklopedia PWN, <https://sjp.pwn.pl/slowniki/narz%C4%99dzie.html> [27.01.2019].

⁶ T.A. Tran, T. Daim (2008), *A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment*, „Technological Forecasting and Social Change” 75(9): 1396–1405, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2008.04.004>.

nia w procesie oceny technologii obejmuje zarówno podejścia zaadaptowane z innych dziedzin, jak i dedykowane specjalnie ocenie technologii. Zestaw ten jest systematycznie uzupełniany o nowe bądź zmodyfikowane metody, dostosowywane do konkretnych uwarunkowań i wymogów projektów, umożliwiając osiągnięcie założonych celów.

Do oceny technologii nieco odmienne metody proponowane są na potrzeby zarządzania technologiami w organizacjach, które muszą dostosowywać nowe rozwiązania do już wykorzystywanych i uwzględnić swój potencjał wykonawczy, niż do oceny technologii jako wyznacznika najistotniejszych, przyszłościowych obszarów z perspektywy rozwoju kraju czy regionu⁷. W przypadku organizacji gospodarczych ocena jest w znacznym stopniu ukierunkowana na możliwości i skutki przede wszystkim finansowe zastosowania konkretnych technologii i obejmuje zarówno dobór technologii stosownie do potrzeb przedsiębiorstwa, jak też bieżące wsparcie procesu pozyskiwania i wdrażania technologii⁸. Jednocześnie w skali mikro ocenę technologii należy odróżnić od oceny instytucji posiadającej portfolio technologii, która odbywać się będzie według kryteriów takich, jak na przykład: rozbudowana baza technologiczna, efektywne procedury umożliwiające przeprowadzenie odnowienia technologicznego, zarządzanie technologiami⁹. Z kolei ocena technologii, której celem jest wspomaganie decyzji polityczno-gospodarczych i interwencji państwa, jest zorientowana na zagadnienia natury ogólnej i ma charakter strategiczny, odnoszący się do skutków wprowadzenia technologii z perspektywy społeczeństwa¹⁰. Jej celem będzie wyłonienie najbardziej obiecujących technologii, o szczególnym znaczeniu gospodarczym i społecznym, a następnie aktywne wspieranie i tworzenie koniunktury do ich rozwoju przez instytucje publiczne.

Niezależnie od podmiotu zlecającego ocenę technologii przedmiotem oceny mogą być opracowane istniejące technologie, posiadające określone cechy, zastosowania i potencjał rozwoju, projekty badawczo-rozwojowe, prowadzące do stworzenia nowych technologii, oraz kierunki badań nad technologiami¹¹. Mimo że ocena technologii zawsze wiąże się z pewną niepewnością, to szczególnie ocena wyłaniających się bądź niedostępnych jeszcze technologii ma najbardziej spekulatywny charakter, gdyż w największym stopniu bazuje na subiektywnych

⁷ Ibidem.

⁸ D. Loveridge (1996), *Foresight, Technology Assessment and Evaluation: synergy or disjunction?*, "Ideas in Progress". Paper Number 5. ASTPP meeting, Amsterdam, <https://pdfs.semanticscholar.org/f4a3/c7cf4d7cd17649d257c82d83746693b7e6a4.pdf> [2.11.2018].

⁹ B. Poteralska (2018), *Metodyka wspomagania rozwoju innowacji technologicznych w jednostce badawczej*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, s. 87.

¹⁰ Ibidem.

¹¹ K. Klincewicz, A. Manikowski (2013), *Ocena, rankingowanie i selekcja technologii*, Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, <https://doi.org/10.7172/2013.www.13>.

opiniach eksperckich. Z drugiej strony wybór, a następnie inwestycja we właściwe technologie w początkowych stadiach rozwoju dają największe możliwości zdobycia przewagi konkurencyjnej i osiągnięcia sukcesu rynkowego.

W literaturze obok terminu „ocena”, który w dwuczłonowym wyrażeniu „ocena technologii” obecnie ma już ugruntowaną definicję (przytoczoną w rozdziale 1.1), funkcjonują liczne pojęcia bliskoznaczne: ewaluacja, analiza, wartościowanie, pozycjonowanie, priorytetyzacja, klasyfikacja czy ranking lub rating. Ich słownikowe definicje zamieszczono w tabeli.

Tabela. „Ocena” i terminy bliskoznaczne

Termin	Objaśnienie
ocena (ang. <i>assessment</i>)	opinia o czymś lub o kimś dokonana w wyniku analizy ¹² ; sąd o wartości ¹³
analiza (ang. <i>analysis</i>)	rozpatrywanie jakiegoś problemu, zjawiska z różnych stron w celu zrozumienia lub wyjaśnienia ¹⁴
ewaluacja (ang. <i>evaluation</i>)	określenie wartości ¹⁵ , ocenianie, oszacowanie ¹⁶ , zazwyczaj przy uwzględnieniu określonych kryteriów i standardów w celu usprawnienia, rozwoju lub zrozumienia ¹⁷ ; proces, który jest elementem zarządzania i podejmowania decyzji ¹⁸
klasyfikacja (ang. <i>classification</i>)	podział na grupy według określonej zasady ¹⁹ (schematu klasyfikacji) ²⁰
typologia (ang. <i>typology</i>)	podział według określonych zasad ²¹ , niekoniecznie rozłączny czy wyczerpujący ²²

¹² Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/ocena;2492427.html> [12.01.2019].

¹³ Słownik języka polskiego, (red.) W. Doroszewski, Warszawa 1958–1968, <https://sjp.pwn.pl/doroszewski/oceniac;5462690.html> [12.01.2019].

¹⁴ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/analiza;2440121.html> [12.01.2019].

¹⁵ Online Business Dictionary, <http://www.businessdictionary.com/definition/positioning.html> [12.01.2019].

¹⁶ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/doroszewski/ewaluacja;5426664.html> [12.01.2019].

¹⁷ Internetowa encyklopedia zarządzania, https://mfiles.pl/pl/index.php/Ewaluacja_projektu [12.01.2019].

¹⁸ Internetowa encyklopedia zarządzania, https://mfiles.pl/pl/index.php/Badanie_ewaluacyjne [12.01.2019].

¹⁹ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/klasyfikacja;2563555.html> [12.01.2019].

²⁰ Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/index.php/Klasyfikacja> [12.01.2019].

²¹ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/typologia;2579028.html> [12.01.2019].

²² Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/index.php/Typologia> [12.01.2019].

Termin	Objaśnienie
wartościowanie (ang. <i>value</i> ²³ , <i>assessment</i> , <i>evaluation</i> ²⁴)	ocenie wartości, klasyfikowanie według wartości ²⁵ ; obliczanie, wyznaczenie wartości ²⁶ ; wydawanie pozytywnej lub negatywnej opinii ²⁷
priorytetyzacja (ang. <i>prioritization</i>)	określenie najważniejszych i najpilniejszych zadań/spraw do wykonania/rozwiązania w pierwszej kolejności ²⁸ ; przyznawanie pierwszeństwa, wysuwanie na pierwszy plan ²⁹
pozycjonowanie (ang. <i>positioning</i>)	ustawianie w określonym miejscu w spisie lub w określonej pozycji ³⁰ w stosunku do innych ³¹
rating (ang. <i>rating</i>)	pomiar jakości, sukcesu lub szczególnych cech, szczególnie w porównaniu z innymi, określenie klasy ³²
ranking (ang. <i>ranking</i>)	klasyfikacja według określonych kryteriów i kolejność ustalona na podstawie osiągniętych wyników ³³ ; lista ułożona na podstawie wartości kryteriów ³⁴

Źródło: opracowanie własne.

Z wymienionych w tabeli terminów najszerze znaczenie ma analiza. Ewaluacja tradycyjnie traktowana jest jako narzędzie zarządzania i definiowana jako systematyczne badanie o analitycznym charakterze, przeprowadzane z wykorzystaniem różnych narzędzi i źródeł w celu oszacowania jakości i wartości³⁵.

²³ Słownik angielski, Linguee, <https://www.linguee.com/polish-english/translation/warto%C5%9Bciowa%C4%87+co%C5%9B.html> [12.01.2019].

²⁴ Słownik online bab.la, <https://pl.bab.la/slownik/polski-angielski/warto%C5%9Bciowanie> [12.01.2019].

²⁵ Słownik języka polskiego, (red.) W. Doroszewski, op. cit., <https://sjp.pwn.pl/doroszewski/wartosciowac;5514067.html> [12.01.2019].

²⁶ Wikipedia, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Warto%C5%9Bciowanie> [12.01.2019].

²⁷ Wielki słownik języka polskiego, http://wsjp.pl/index.php?id_hasla=29622 [12.01.2019].

²⁸ Słownik języka angielskiego, Cambridge, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/prioritize?q=prioritization#dataset-cbed> [12.01.2019].

²⁹ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/poradnia/haslo/priorytetyzacja;794.html> [12.01.2019].

³⁰ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/poradnia/haslo/Pozycjonowanie;18377.html> [12.01.2019].

³¹ Online Business Dictionary, <http://www.businessdictionary.com/definition/positioning.html> [12.01.2019].

³² Słownik języka angielskiego, Cambridge, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/rating#dataset-cbed> [12.01.2019].

³³ Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/encyklopedia/ranking.html> [12.01.2019].

³⁴ Słownik języka angielskiego, Cambridge, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ranking#dataset-cbed> [12.01.2019].

³⁵ K. Olejniczak (2008), *Wprowadzenie do zagadnień ewaluacji*, w: K. Olejniczak, M. Kozak, B. Ledzion (red.), *Teoria i praktyka ewaluacji interwencji publicznych: podręcznik akademicki*, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, s. 17–43, http://rszarf.ips.uw.edu.pl/ewalps/teksty/olejniczak_podrecznik.pdf [12.02.2019].

Pozycjonowanie związane jest z tworzeniem rankingu i określaniem miejsca na liście. Klasyczna definicja ratingu to ocena wiarygodności kredytowej³⁶ czy ocena popularności na podstawie badań ankietowych³⁷ do klasyfikacji według stopnia lub jakości. W monografii wykorzystywane jest rozszerzone znaczenie ratingu, funkcjonujące w języku angielskim jako pomiar jakości, sukcesu lub specyficznych cech i, szczególnie w porównaniu z innymi, określenie klasy. Subtelna różnica pomiędzy rankingiem a ratingiem polega na tym, że ranking ustala obiektom względną pozycję w grupie, zaś rating, oceniając, także na podstawie określonych kryteriów nadaje pozycję na ustalonej skali.

Priorytetyzację najprościej można zdefiniować jako przyznawanie pierwszeństwa, szeregowanie, klasyfikację według wybranych kryteriów. Priorytetyzacja może mieć formę wyczerpującego i rozłącznego podziału na grupy, czyli klasyfikacji, i tym samym przyjąć formę ratingu bądź uszeregowanej listy, czyli rankingu. Zadaniem priorytetyzacji technologii jest jednoznaczne wskazanie technologii o znaczeniu kluczowym, strategicznym, o dużym potencjale wniesienia wkładu w rozwój gospodarczy, budowania długoterminowej przewagi konkurencyjnej przy jednoczesnym zaspokajaniu potrzeb społecznych z zachowaniem dbałości o środowisko, lecz z uwzględnieniem ograniczoności funduszy inwestycyjnych.

Korzystanie z ustrukturyzowanych metod priorytetyzacji technologii wynika z potrzeby wparcia wiedzy i kompetencji decydentów, zarówno na poziomie ogólnosięciowym, krajowym, regionalnym, jak też instytucjonalnym, z zakresu prowadzonej polityki i obranej strategii rozwoju technologicznego. Obszar decyzyjny dotyczący perspektywicznego zarządzania technologiami wiąże się z dużym ryzykiem z powodu swojego spekulatywnego charakteru, ale również ze względu na dużą liczbę niezbędnych aspektów, które należy brać pod uwagę. Priorytetyzacja technologii umożliwia podjęcie kompleksowych i przemyślanych działań pozwalających sprostać wyzwaniom zorientowanego na przyszłość zarządzania technologiami. Umożliwia wskazanie w zbiorze tych rozważanych technologii, które warto wspierać w ramach polityki innowacyjnej i w które opłaca się inwestować, gdyż mogą przełożyć się na wymierne sukcesy ekonomiczne, zdobycie i utrzymanie przewagi konkurencyjnej i/lub zrównoważony rozwój społeczny. Przykładowe działania, które implikowane są wynikami priorytetyzacji, podają P. Radziszewski i in.³⁸: zwiększenie wydatków na badania, dostosowanie (ukierunkowanie) systemu edukacji, wprowadzenie odpowiednich prawnych, administracyjnych i ekonomicznych mechanizmów, zwiększenie akceptacji społecznej.

³⁶ Wielki słownik języka polskiego, http://wsjp.pl/index.php?id_hasla=61781 [12.01.2019].

³⁷ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/rating;2573489.html> [12.01.2019].

³⁸ P. Radziszewski, J. Nazarko, T. Vilutiene, K. Dębkowska, J. Ejdyś, A. Gudanowska, K. Halicka, J. Kilon, A. Kononiuk, K.J. Kowalski, J.B. Król, Ł. Nazarko, M. Sarnowski (2016), *Future trends in road pavement technologies development in the context of environmental protection*, "The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering" 11(2): 160–168, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.19>.

Konieczność priorytetyzacji technologii, a jednocześnie niedoskonałość obecnie używanych metod sprawia, że tematyka stosowania właściwych metod, modeli i narzędzi w procesie oceny jest ciągle aktualna. Szczególnych studiów wymaga nie do końca rozpoznana kwestia modelowania niepewności ocen oraz zasad wyznaczania ważności kryteriów będących podstawą oceny. Zidentyfikowana na podstawie przeglądu literatury i recenzji dotychczasowych projektów oceny technologii **luka badawcza** to brak badań i wiedzy dotyczących wykorzystania modeli hybrydowych do ograniczenia arbitralności decyzyjnej przy ujmowaniu subiektywnych opinii.

Podjęty w monografii **problem badawczy** dotyczy możliwości wykorzystania w procesie priorytetyzacji technologii hybrydowego modelu, łączącego metody zbiorów przybliżonych (ang. *Rough Sets*) oraz metodę *Data Envelopment Analysis* (DEA) w celu zwiększenia obiektywizmu oceny. Zdaniem autorki integracja metod oceny technologii na potrzeby przedsięwzięć technologicznych w warunkach niepewności otoczenia – kształtowanej jego złożonością, dynamiką oraz wysoką konkurencyjnością – jest warunkiem skutecznego eksplorowania i eksploataowania szans technologicznych.

Cel naukowy monografii stanowi opracowanie hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii w warunkach niepewności wraz z rekomendacjami stosowania w procesie priorytetyzacji zebranymi w postaci algorytmu. Autorski hybrydowy model dedykowany jest perspektywicznej, priorytetyzującej ocenie technologii zorientowanej na makrozarządzanie, przeprowadzanej w sytuacji braku możliwości jednoznacznego określenia parametrów i potencjału technologii oraz wynikającej z tego niepewności. W modelu zaproponowano wykorzystanie elementów z teorii zbiorów przybliżonych i metody *Data Envelopment Analysis*. Oryginalność i innowacyjność podejścia zasadza się na konstrukcji modelu. Metody teorii zbiorów przybliżonych zostały użyte dwukrotnie: do selekcji istotnych kryteriów oceny technologii oraz do modelowania rozbieżności indywidualnych ocen. Metoda DEA zastosowana została z kolei do określenia wag poszczególnych kryteriów oceny oraz ustalenia rankingu technologii. Przeprowadzone studia literaturowe pozwalają stwierdzić, że podejście to według założeń przyjętych w monografii nie było stosowane przez innych autorów w odniesieniu do oceny technologii. Ponadto w dotychczasowych badaniach, w obszarach bezpośrednio nie związanych z oceną technologii, zidentyfikowano przykłady tylko pojedynczego łączenia metod zbiorów przybliżonych i DEA.

Uszczegółowieniem celu naukowego i postawionego problemu są następujące **pytania badawcze**, na które odpowiedzi poszukiwano w kolejnych częściach monografii:

1. Jakie metody badawcze znajdują zastosowanie w priorytetyzacji technologii?
2. Jakie atrybuty zbiorów przybliżonych i DEA uprawomocniają celowość ich wykorzystania w priorytetyzacji technologii?

3. Jakie są dotychczasowe zastosowania zbiorów przybliżonych i metody DEA?
4. Jaki efekt synergiczny wynika z połączenia koncepcji zbiorów przybliżonych i metody DEA?
5. Jakie są ilościowe i jakościowe efekty zastosowania hybrydowego modelu w porównaniu z tradycyjną metodą kluczowych technologii?

Proponowana w pracy integracja metody badań operacyjnych z metodami z teorii mnogości w opracowanym hybrydowym modelu priorytetyzacji technologii uwzględnia konieczność wieloaspektowej, obiektywnej oceny z jednoczesnym modelowaniem niejednoznaczności jednostkowych ocen. Przegląd i weryfikacja dotychczasowej wiedzy z zakresu matematycznych metod oceny i priorytetyzacji technologii wskazuje na zasadność takiego podejścia. Założenia co do danych wejściowych w metodach zbiorów przybliżonych dobrze oddają specyfikę wieloatrybutowego, realizowanego wielokrotnie za pomocą zmiennych dyskretnych, opisu technologii w systemach oceny. Opracowany model wypełnia lukę w obszarze priorytetyzacji technologii zarówno pod względem eliminacji arbitralności selekcji kryteriów oceny, jak i uwzględniania niepewności wartości kryteriów oceny. Zdaniem autorki zaprojektowany hybrydowy model przyczynia się do rozwoju teorii w obszarze priorytetyzacji technologii i wnosi wkład w rozwój dyscypliny naukowej, jaką jest inżynieria produkcji. Poprawność modelu została zweryfikowana na danych projektu foresight «NT FOR Podlaskie 2020», co pozwoliło udowodnić jego użyteczność jako narzędzia wspomagania procesu decyzyjnego w zarządzaniu technologią.

Monografia obejmuje cztery rozdziały. Każdy z nich poprzedzono krótkim wstępem przedstawiającym jego zawartość i uzasadniającym zasadność umieszczenia go w monografii. Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do tematu poprzez wyjaśnienie pojęć kluczowych dla prezentowanej metody, takich jak technologia, metody oceny technologii, a także obecne w literaturze ukierunkowane na przyszłość podejścia do oceny. Sprecyzowano w nim istotę priorytetyzacji, dokonano syntezy wiedzy z zakresu metod priorytetyzacji, wskazano problemy i wyzwania procesu oraz najczęściej stosowane metody. W rozdziale umieszczono także bazujące na przeglądzie literatury uzasadnienie opracowania nowego modelu oceny technologii. Dokonano analizy dotychczasowego zakresu i celów wykorzystania metod zbiorów przybliżonych i metody DEA. W rozdziale drugim ujęto propedeutykę metod wykorzystanych w hybrydowym modelu oceny. Motywem umieszczenia w monografii teoretycznych podstaw zbiorów przybliżonych i metody DEA była potrzeba przeprowadzenia syntezy rozproszonych w różnych źródłach informacji, objaśnienie i uporządkowanie wykorzystanych w hybrydowym modelu pojęć. Przedstawione koncepcje metod ilustrują przytoczone definicje, wzory i opracowane rysunki. W rozdziale trzecim przedstawiono autorski hybrydowy model priorytetyzacji technologii oraz zaproponowano proces priorytetyzacji technologii z uwzględnieniem jego ogra-

niczeń oraz potencjału. Podjęto próbę omówienia w sposób możliwie wyczerpujący zarówno ideę proponowanego modelu, jak i jego szczegółowe algorytmy. W rozdziale czwartym przeprowadzono analizę materiału empirycznego, wykorzystując opracowane podejście. Skonfrontowano uzyskane wyniki z wynikami badań otrzymanymi za pomocą innych metod badawczych. Rezultaty weryfikacji upoważniają do stwierdzenia, że proponowany hybrydowy model stanowi wartościowe narzędzie oceny technologii – może ułatwić podejmowanie decyzji i ich społeczne legitymizowanie. Monografię kończy podsumowanie zawierające syntezę najważniejszych wyników oraz wniosków z przeprowadzonych analiz.

Pragnę bardzo serdecznie podziękować Panu prof. dr. hab. inż. Joanicujszowi Nazarko za wsparcie merytoryczne, okazaną pomoc i życzliwość, poświęcony czas. Podziękowania kieruję również do Recenzentów, Pana prof. dr. hab. inż. Cezarego Orłowskiego oraz Pana dr. hab. inż. Romana Szewczyka, prof. PW, za wnikliwą lekturę pracy oraz cenne uwagi i sugestie, które pozwoliły udoskonalić ostateczną wersję pracy.

1. Priorytetyzacja technologii – definicje, istota i metody

Ocena technologii, w zależności od celu i kontekstu, określana jest w literaturze wieloma definicjami. Niejednoznaczność dotyczy również samego terminu „technologia”. Pierwszy rozdział monografii rozpoczęto od przedstawienia genezy i wybranych definicji technologii, a także definicji wykreowanych podejść w zorientowanym na przyszłość zarządzaniu technologiami. W kolejnych częściach rozdziału, na podstawie studiów literaturowych, poszukiwano odpowiedzi na dwa pytania badawcze:

1. Jakie metody badawcze znajdują zastosowanie w priorytetyzacji technologii?
2. Jakie są dotychczasowe zastosowania zbiorów przybliżonych i metody DEA?

W tym celu zwięźle zaprezentowano metody obecnie stosowane w ocenie technologii oraz istotę procesu priorytetyzacji. Przedstawiając syntetycznie obecny stan wiedzy z dziedziny technologii i ograniczając się do przytoczenia wybranych objaśnień, jednocześnie podano odnośniki do prac i autorów szerzej rozpatrujących podnoszone kwestie. Funkcją rozdziału jest usytuowanie w obszarze badań nad oceną technologii proponowanego w monografii modelu, a także wskazanie luk i wyzwań w procesie priorytetyzacji, które mógłby hybrydowy model wypełnić i którym mógłby sprostać. W podrozdziale 1.2 przeprowadzono analizę dotychczasowych zastosowań metody zbiorów przybliżonych i metody DEA w celu uzasadnienia proponowanego modelu.

1.1. Technologia – objaśnienie pojęć kluczowych

Termin „technologia” wywodzi się z języka greckiego od słowa *τέχνη* [techné], oznaczającego sztukę, naukę, rzemiosło, biegłość, chytryść³⁹. Temat słowotwórczy -logia (greckie *λόγος* [logós]) wskazuje na związek znaczeniowy z wypowiedzią, z nauką i teorią⁴⁰. Pokrewnym terminem jest „technika” – greckie *τεχνικός* [technikós], czyli kunsztowny, artystyczny, biegły⁴¹.

W literaturze istnieje wiele definicji technologii. Dodatkowy problem z terminem „technologia” w języku polskim wynika z ewolucji pojęć „technologia” i „technika”, których pierwotne nieco odmienne znaczenie nieuniknienie pod wpływem języka angielskiego zaciera się⁴². Zgodnie ze słownikiem PWN-

³⁹ W. Kopaliński (1983), *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*, Wiedza Powszechna, Warszawa.

⁴⁰ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/slowniki/logia.html> [2.07.2018].

⁴¹ W. Kopaliński, op. cit.

⁴² Z. Łucki, *Proszę... nie mówmy „technologia” na technikę!*, http://www.uci.agh.edu.pl/bip/63/11_63.htm [1.07.2018]; R. Lizut, *Filozofia techniki: problematyka, nurty, trudności*, <http://>

OXFORD University Press angielski termin *technology* tłumaczony może być zarówno jako technika, ale też i technologia, stąd przyjmuje się tradycyjną translację: ang. *science and technology* – nauka i technika, lecz ang. *new technologies* – nowe technologie⁴³. Odwrotna zależność nie jest odnotowana – angielski wyraz *technique* w języku polskim odpowiada słowu „technika”⁴⁴.

Encyklopedia PWN definiuje technologię następująco: „dziedzina techniki zajmująca się opracowywaniem i przeprowadzaniem najkorzystniejszych w określonych warunkach procesów wytwarzania lub przetwarzania surowców, półwyrobów i wyrobów”⁴⁵. Słownik języka polskiego rozszerza powyższe wyjaśnienie, dodając, że może być to również tylko „metoda przeprowadzania procesu produkcyjnego lub przetwórczego”⁴⁶. Ponadto, nawet w starszych leksykonach polskich, można odnaleźć także objaśnienie technologii w znaczeniu techniki⁴⁷, która określana jest z kolei jako: „dziedzina ludzkiej działalności, której celem jest oparte na wiedzy (na podstawach naukowych) produkowanie rzeczy i wywoływanie zjawisk niewystępujących w przyrodzie oraz przekształcanie wytworów przyrody”⁴⁸.

Obecne w literaturze liczne definicje technologii precyzują słownikowe objaśnienia. Zbliżone do definicji encyklopedycznych jest określenie technologii w naukach technicznych K. Santarka⁴⁹: „całokształt wiedzy dotyczącej metod wytwarzania określonego produktu (wyrobu bądź usługi) albo uzyskania określonego efektu w przemyśle bądź usługach”. Do potrzeb analizy i specyfikacji matematycznych metod oceny, selekcji i rankingowania technologii (w zakres których wpisuje się prezentowana w monografii hybrydowy model priorytetyzacji technologii) K. Klincewicz i A. Manikowski⁵⁰ przyjęli definicję sformułowaną przez B. Stieglera⁵¹: „technologia jest zorganizowaną materią nieorganiczną – materialnym przejawem ludzkiej wiedzy i wynikiem działań organizatorskich, wykorzystywanych do celów praktycznych (w tym: zastosowań gospodarskich)”. Objaśnieniem technologii może być, przywołana także w pracy K. Klincewicza i A. Manikowskiego⁵² z raportów Organizacji Współpracy Gospodarczej

sapiencjokracja.pl/filozofia-techniki-problematyka-nurty-trudnosci/ [1.07.2018].

⁴³ PWN-OXFORD University Press, <https://oxford.pwn.pl/szukaj/technology.html> [1.09.2018].

⁴⁴ PWN-OXFORD University Press, <https://oxford.pwn.pl/szukaj/technique.html> [1.09.2018].

⁴⁵ Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/technologie;3985964.html> [2.07.2018].

⁴⁶ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/technologie;2577699.html> [2.07.2018].

⁴⁷ Słownik języka polskiego, (red.) W. Doroszewski, op. cit., <https://sjp.pwn.pl/doroszewski/technologie;5507035.html> [2.07.2018].

⁴⁸ Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/technika;3985955.html> [2.07.2018].

⁴⁹ K. Santarek (red.), J. Bagiński, A. Buczacki, D. Sobczak, A. Szerenos (2008), *Transfer technologii z uczelni do biznesu. Tworzenie mechanizmów transferu technologii*, PARP, Warszawa, <https://www.parp.gov.pl/files/74/81/194/4372.pdf> [2.07.2018].

⁵⁰ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

⁵¹ B. Stiegler (1998), *Technics and Times, 1. The fault of Epimetheus*, Stanford University Press, Stanford.

⁵² K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

i Rozwoju (*Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD*)⁵³, a oryginalnie zamieszczona w publikacji Z. Grilichesa⁵⁴, definicja technologii jako stanu wiedzy, dotyczącego sposobów przekształcania zasobów w rezultaty oczekiwane przez rynek zarówno w formie niematerialnej, jak i materialnej. Z kolei zdaniem J. Łunarskiego⁵⁵: „technologia jest ukierunkowanym procesem wytwarzania potrzebnych produktów i usług, realizowanym w zhierarchizowanym systemie produkcyjnym o zidentyfikowanych elementach i ich powiązaniach, zbudowanym dla realizacji tego procesu w oparciu o dostępną wiedzę teoretyczną i praktyczną.” Próby usystematyzowania objaśnień terminu i jego desygnatów wielokrotnie były podejmowane w literaturze, zawierają je prace między innymi P. Lowe’a⁵⁶, K. Klincewicz i A. Manikowskiego⁵⁷, K. Halickiej⁵⁸, A. Gudanowskiej⁵⁹, J. Łunarskiego⁶⁰, J. Kaczmarka⁶¹.

Niezależnie od rozpatrywanej definicji technologii, każda z nich ujmuje bezpośredni związek technologii z procesami wytwórczymi, praktyką przemysłową, usługami. Usytuowanie technologii w *continuum* wiedzy lokuje ją pomiędzy nauką a wiedzą specjalistyczną (ang. *know-how*), przed techniką (sztuką) przemysłową i praktyką rzemieślniczą (co zostało przedstawione na rysunku 1.1 za pomocą relacji odwoływania). Chociaż granica pomiędzy obszarami jest rozmyta i dynamiczna, warto zaznaczyć, że w przeciwieństwie do nauki, technologia jest zasobem o konkretnej wartości rynkowej⁶². Wycenia technologię skomercjalizowany model biznesowy, który może obejmować na przykład wykorzystanie technologii w istniejącej działalności, licencjonowanie/sprzedż lub nowe przedsięwzięcie eksploatujące technologię⁶³.

⁵³ OECD (2001), *Measuring Productivity. Measurement of aggregate and industry-level productivity growth*, OECD, Paris, <http://www.oecd.org/dataoecd/59/29/2352458.pdf> [2.07.2018]

⁵⁴ Z. Griliches (1987), *Productivity: Measurement Problems*, w: J. Eatwell, M. Milgate, P. Newman (red.), *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, vol. 3, Palgrave Macmillan

⁵⁵ J. Łunarski (2009), *Zarządzanie technologiami. Ocena i doskonalenie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, s. 11.

⁵⁶ P. Lowe (1995), *Management of Technology: Perception and opportunities*, Chapman and Hall.

⁵⁷ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

⁵⁸ K. Halicka (2016), *Prospektywna analiza technologii – metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok.

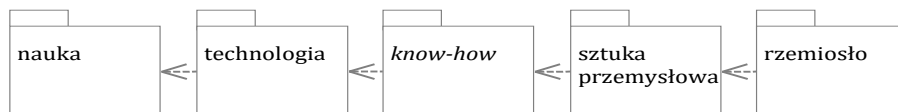
⁵⁹ A.E. Gudanowska (2015), *Istota współczesnych technologii w kontekście procesów zarządzania technologią i foresightu technologicznego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie” 83: 195–205.

⁶⁰ J. Łunarski, *Zarządzanie technologiami...*, op. cit.

⁶¹ J. Kaczmarek (red.) (2001), *Projektowanie technologii maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.

⁶² P. Lowe, *Management of Technology...*, op. cit., s. 7.

⁶³ H. Chesbrough (2003), *Open Initiative: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology* Boston, MA: Harvard Business School Press.



Rysunek 1.1. Hierarchia nauki, technologii, know-how, sztuki przemysłowej i rzemiosła

Źródło: opracowanie własne na podstawie: P. Lowe (1995), *Management of Technology: Perception and opportunities*, Chapman and Hall, s. 6.

W monografii, dla potrzeb przedstawienia hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii, przyjęto, że termin „technologia” odnosi się do metod, procesów, systemów i urządzeń, które są wynikiem wykorzystania wiedzy naukowej do celów przekształcania zasobów i wytwarzania oczekiwanych rezultatów, przy czym możliwe jest również wystąpienie efektów niepożądanych. Uznano, że technologie można opisać przez ich funkcjonalności o określonych dla decydentów wartościach, przez co możliwe jest ich porównanie i ocena. Tym samym, za C. Orłowskim i A. Czarneckim⁶⁴, przyjęto, że każda technologia da się scharakteryzować szeregiem danych, które są własnością technologii lub wynikają z jej otoczenia i które są danymi wejściowymi modelu oceniającego. W monografii nie zakłada się ograniczeń co do specyfiki konkretnych technologii, które poddaje się ocenie za pomocą hybrydowego modelu, lecz wymagana jest możliwość opisu analizowanych technologii, korzystając ze zunifikowanego, określonego *a priori* zbioru atrybutów.

Technologie odgrywają bardzo istotną rolę zarówno w odniesieniu do rozwoju całej gospodarki, determinując tym samym poziom życia społeczeństwa⁶⁵, jak i na poziomie poszczególnych przedsiębiorstw. Stanowią one podstawę nowoczesnych procesów wytwórczych. Stosowanie danej technologii to wytwarzanie określonego wyrobu (bądź świadczenie usługi) o założonych cechach, funkcjonalności i jakości, ale też ponoszenie nakładów w postaci materiałów, energii, pracy ludzi i innych, co determinuje możliwość osiągnięcia finansowych i pozafinansowych korzyści. Wykorzystywany portfel technologii bezpośrednio przekłada się na produktywność i efektywność przedsiębiorstw. Strategie technologiczne są integralną częścią ogólnych strategii rozwoju przedsiębiorstw, wyznaczając ich model biznesowy oraz kierunek rozwoju. Jednocześnie konkurencyjność przedsiębiorstw działających na obszarze danego kraju przekłada się na jego znaczenie na arenie międzynarodowej⁶⁶.

⁶⁴ C. Orłowski, A. Czarnecki (2007), *Możliwości zastosowania ontologii do oceny technologii informatycznych*, w: R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 2, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 143–152.

⁶⁵ R. Szewczyk (red.), K. Mieczkowski, T. Missala, C. Lichodziejewski, M. Andrzejczak, A. Buwała, W. Winiarski, K. Pietruszyńska, K. Rzeplińska-Rykała, D. Zbińkowska, M. Komorowska, K. Roszkowski (2008), *Foresight województwa mazowieckiego: krzyżowa analiza wpływów, scenariusze rozwoju, priorytetowe technologie*, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa, s. 6.

⁶⁶ Ibidem.

Niezbędne jest uwzględnianie technologii także w strategii rozwoju regionów i państw. Potencjał rynkowy opracowywanych i wdrażanych technologii oraz ich innowacyjność to najważniejsze czynniki determinujące poprawę konkurencyjności gospodarek, podstawa budowania dobrobytu społecznego i ekonomicznego. Postęp technologiczny jest bezspornie jednym z najważniejszych źródeł wzrostu gospodarczego⁶⁷. Twierdzenie podkreślające rolę zmian technologicznych w długoterminowym wzroście, sformułowane w modelu wzrostu ekonomicznego w pracy *A Contribution to the Theory of Economic Growth*⁶⁸ już pod koniec lat pięćdziesiątych XX wieku, było podstawą nadania jego autorowi, R.M. Solowi, nagrody Nobla w 1987 roku w dziedzinie ekonomii⁶⁹. Przyjmując jako miernik rozwoju technologicznego intensywność działalności patentowej, analiza ujętego ilościowo zakresu tej aktywności w różnych krajach bezpośrednio odzwierciedla różnice w poziomie rozwoju gospodarczego wyrażonego przez PKB⁷⁰.

Świadomość potrzeby wspierania rozwoju technologicznego na poziomie regionalnym, krajowym i międzynarodowym przejawia się w objęciu tego obszaru interwencją publiczną, zwłaszcza że inwestycje w proces innowacji mogą być nieopłacalne dla przedsiębiorstw⁷¹. Konieczność stosowania racjonalnych, systemowych działań w tym obszarze stanowi uzasadnienie tworzenia programów wspierających rozwój technologii, instytutów badawczych oraz centrów badań i rozwoju, a także prowadzenia odpowiedniej polityki fiskalnej, wspierającej technologie zapewniające zrównoważony rozwój, korzystne ekonomicznie, społecznie i środowiskowo.

Szybkość zmian technologicznych, powstawanie nowych technologii wymuszają nieustanną ewaluację posiadanej technologii. Zarządzanie technologiami (ang. *Technology Management* – TM) nie może koncentrować się tylko na stanie obecnym, lecz jest procesem obejmującym zarówno systematyczną analizę i ocenę posiadanych technologii, odpowiednie ich wykorzystanie, na tle dostępnych zidentyfikowanych możliwości, jak i tworzenie i pozyskiwanie nowych w celu ulepszenia produktów i/lub procedur. Właściwe zarządzanie technologiami dotyczy każdego sektora gospodarki, także sektora usług publicznych, takich jak administracja, ochrona zdrowia czy edukacja.

⁶⁷ G.R. Mitchell (1999), *Global Technology Policies for Economic Growth*, "Technological Forecasting and Social Change" 60(3): 205–214, [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(98\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(98)00044-4).

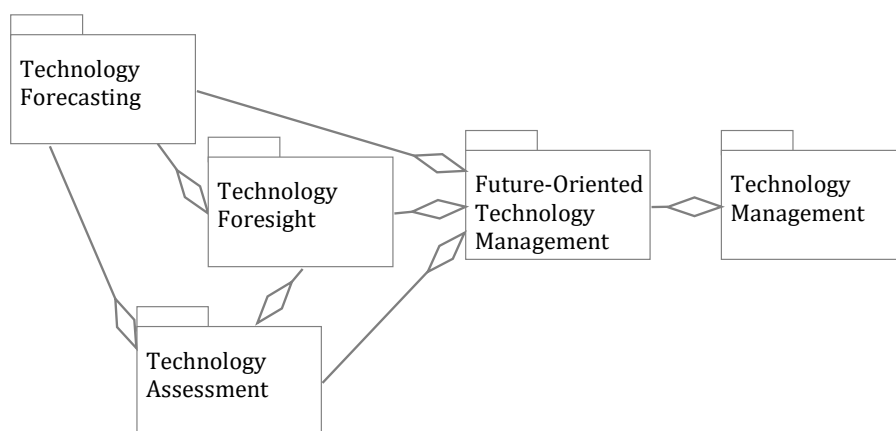
⁶⁸ R.M. Solow (1956), *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, "The Quarterly Journal of Economics" 70(1): 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>.

⁶⁹ E. Garfield (1988), *Theory of Technology's Role in Economic Growth Brings MIT's Robert M. Solow the 1987 Nobel Prize in Economic Sciences*, "Essays of an Information Scientist 11, Science Literacy, Policy, Evaluation, and Other Essays".

⁷⁰ WIPO (2018), *World Intellectual Property Indicators*, World Intellectual Property Organization, Geneva, https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_941_2018.pdf [1.12.2018].

⁷¹ K. Olejniczak, M. Kozak, B. Ledzion (red.) (2008), *Teoria i praktyka ewaluacji interwencji publicznych: podręcznik akademicki*, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, Warszawa, s. 484.

W nurcie zarządzania technologiami, w aspekcie ukierunkowania na przyszłość, wykreowały się trzy podejścia: ocena technologii (ang. *Technology Assessment* – TA), foresight technologiczny (ang. *Technology Foresight* – TF) i prognozowanie technologiczne (ang. *Technology Forecasting*), które łącznie obejmuje koncepcja zorientowanej na przyszłość oceny technologii (ang. *Future-Oriented Technology Assessment* – FTA)⁷². Schematyczny, o wysokim poziomie ogólności, związek pomiędzy wymienionymi ujęciami zarządzania technologią przedstawiono na rysunku 1.2 za pomocą relacji agregacji częściowej UML, wskazując, że poszczególne koncepcje (zilustrowane jako pakiety) mogą należeć do nadrzędnej idei, jednak nie są od niej zależne. Niedoskonałość emulacji, w tym wielokrotność agregacji, wynika ze złożonych współzależności pomiędzy koncepcjami i ich przenikania się.



Rysunek 1.2. Koncepcje zorientowanej na przyszłość oceny technologii

Źródło: opracowanie własne.

Rozwój oceny technologii wiąże się z realizowanymi pod koniec lat pięćdziesiątych XX wieku przedsięwzięciami dotyczącymi prognozowania rozwoju technologii i ich konsekwencji⁷³. Samo pojęcie *Technology Assessment*, przypisywane E.Q. Daddario, zostało sformułowane pod koniec lat sześćdziesiątych XX wieku w Stanach Zjednoczonych jako nazwa badania i kształtowania przez Kongres USA polityki wobec postępu technologicznego, a także wspierania zarządzania tech-

⁷² K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii...*, op. cit.

⁷³ G. Azzone, R. Manzini (2008), *Quick and dirty technology assessment: The case of an Italian Research Centre, "Technological Forecasting and Social Change"* 75(8): 1324–1338. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2007.10.004>; A. Mazurkiewicz, B. Poteralska (2012), *System of a complex assessment of technological innovative solutions*, „Problemy Eksploatacji” 4: 5–21, http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0070-0029/c/Mazurkiewicz_4_2012.pdf [1.11.2018].

nologią⁷⁴. Ocena technologii była definiowana jako próba ustanowienia systemu wczesnego ostrzegania, wykrywania i kontrolowania zmian i rozwoju technologii w celu maksymalizowania dobra publicznego, jednocześnie minimalizując ryzyko⁷⁵. Współcześnie M. Decker i M. Ladikas⁷⁶ ocenę technologii określili jako naukowy, interaktywny i komunikatywny proces, którego celem jest przyczynienie się do kształtowania opinii publicznej i politycznej na temat społecznych aspektów wykorzystania nauki i technologii. Celem oceny technologii jest wspomaganie decyzji, przede wszystkim politycznych, w sferze publicznej⁷⁷ poprzez dostarczenie informacji w postaci zestawu opcji, alternatyw i opisu konsekwencji zastosowania technologii⁷⁸. Związał definicję oceny technologii przedstawił J. Kaźmierczak⁷⁹: „zespół zagadnień, związanych z oceną oddziaływań pomiędzy efektami szeroko rozumianej działalności inżynierskiej a ich otoczeniem społecznym”. Podsumowując inne licznie obecne w literaturze definicje oceny technologii, bardzo ogólnie określić ją można jako systematyczną próbę identyfikacji i ewaluacji konsekwencji wprowadzenia i rozwoju określonych technologii we wszystkich obszarach (m.in. społecznych, środowiskowych, ekonomicznych), na które może oddziaływać, również niezamierzonych, pośrednich i opóźnionych⁸⁰.

⁷⁴ A.L. Ported (1995), *Technology Assessment*, "Impact Assessment" 13(2): 135–151, <https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726087>; A. Wad, M. Radnor (1984), *Technology assessment: review and implications for developing countries*, Science policy studies and documents 61, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO.

⁷⁵ M.J. Cetron, L.W. Connor (1972), *A Method for Planning and Assessing Technology against Relevant National Goals in Developing Countries*, w: M.J. Cetron, B. Bartocha (red.), *The Methodology of Technology Assessment*, Gordon and Breach, New York, za: J. van den Ende, K. Mulder, M. Knot, E. Moors, P. Vergragt (1998), *Traditional and Modern Technology Assessment: Toward a Toolkit*, "Technological Forecasting and Social Change" 58: 5–21, [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(97)00052-8).

⁷⁶ M. Decker, M. Ladikas (red.) (2004), *Bridges between Science, Society and Policy. Technology Assessment – Methods and Impacts*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 14. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06171-8>; Technology Assessment in Europe; Between Method and Impact (TAMI), Final report of the TAMI project (2004), https://www.ta-swiss.ch/2004_TAMIfinalreport_e.pdf [2.11.2018].

⁷⁷ B. Poteralska, *Metodyka wspomagania...*, op. cit., s. 83.

⁷⁸ J.F. Coates (1976), *Technology assessment – A tool kit*, "Chemtech": 372–383, za A.L. Ported (1995), *Technology Assessment*, "Impact Assessment" 13(2): 135–151, <https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726087>.

⁷⁹ J. Kaźmierczak (2018), *Ocena społecznych oddziaływań technologii jako wyzwanie współczesności*, referat, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Technicznej „Zarządzanie Bezpieczeństwem w Technikach, Technologiach i Polityce Transportowej”, 28–30.11.2018, <http://ptot.pl/assets/docs/JK%20MPL%20Pyrzowice%20%202018%20prezentacja.ppt> [29.12.2018].

⁸⁰ J.F. Coates, *Technology assessment...*, op. cit.; E. Braun (2005), *Technology in Context. Technology assessment for managers*, Routledge; M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.) (2015), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43), s. 5–9; Ł. Nazarko (2015), *Technology Assessment in Construction Sector as a Strategy towards Sustainability*, "Procedia Engineering Operational Research in Sustainable Development

Według P. Lowe'a⁸¹ proces ten należy podzielić na audyt pozwalający odpowiedzieć na pytanie, jakie technologie są obecnie wykorzystywane i z jakim efektem w porównaniu do najlepszych praktyk, oraz formułowanie oczekiwań, definiowanie założeń co do przyszłości i możliwych innowacji. Kompleksowy system oceny innowacyjnych technologii, obejmujący ocenę dojrzałości wdrożeniowej, potencjału komercyjnego i poziomu innowacyjności, zaproponowali A. Mazurkiewicz i B. Poteralska⁸².

Powiązana z oceną technologii jest koncepcja studiów nad nauką i techniką/technologią (ang. *science and technology studies; science, technology and society studies, STS*), którą można określić jako dziedzinę interdyscyplinarnych badań relacji między wiedzą naukową, systemami technologicznymi a społeczeństwem, korzystającą z metod badawczych przede wszystkim socjologii, antropologii, filozofii⁸³. W przedmiocie badań zainteresowań STS można wyróżnić dwa nurty zagadnień. Pierwszy obejmuje badania dotyczące natury i praktyk związanych z nauką i technologią i odnosi się do szeregu zagadnień, takich jak: metoda naukowa, wiarygodność i obiektywizm nauki, powstawanie dyscyplin. Drugi obszar dotyczy w większym stopniu wpływu i kontroli nauki i technologii, ze szczególnym uwzględnieniem ryzyka, korzyści i szans, jakie nauka i technologia mogą stwarzać dla pokoju, bezpieczeństwa, społeczności, demokracji, zrównoważenia środowiskowego i ludzkich wartości⁸⁴. Biorąc pod uwagę to pole badawcze STS, w pewnym stopniu uzasadniona może być wątpliwość, sformułowana przez E. Bińczyk⁸⁵, czy ocena technologii powinna być uznawana za autonomiczny obszar badawczy, a nie jako rodzaj doradztwa politycznego wykorzystujący ustalenia wypracowane w obrębie STS.

Prognozowanie technologiczne najprościej, za J. Łunarskim⁸⁶, zdefiniować można jako sformułowanie przewidywanych kierunków rozwoju technologii

and Civil Engineering "– meeting of EURO working group and 15th German – Lithuanian – Polish colloquium (ORSDC): 290–295, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.038>; K. Klineciewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

⁸¹ P. Lowe, *Management of Technology...*, op. cit.

⁸² A. Mazurkiewicz, B. Poteralska, *System of a complex...*, op. cit.

⁸³ S. Roosth, S. Silbey (2009), *Science and Technology Studies: From Controversies to Posthumanist Social Theory*, <https://doi.org/10.1002/9781444304992.ch23>, w: B.S. Turner, *The New Blackwell Companion to Social Theory*, Blackwell Publishing Ltd., <https://doi.org/10.1002/9781444304992>.

⁸⁴ Strona internetowa programu studiów nad nauką, technologią i społeczeństwem Szkoły Administracji Publicznej im. Johna F. Kennedy'ego na Uniwersytecie Harvarda (The Program on Science, Technology and Society at Harvard University's John F. Kennedy School of Government), <http://sts.hks.harvard.edu/about/whatissts.html> [1.01.2019].

⁸⁵ E. Bińczyk (2015), *Monitorowanie technologii a nieusuwalne granice sterowalności (na przykładzie krytyki projektu inżynierii klimatu)*, w: M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43): 113–136.

⁸⁶ J. Łunarski, *Zarządzanie technologiami...*, op. cit.

i postępu technologicznego. Według K. Santarka⁸⁷ prognozowanie technologiczne jest jedną z funkcji zarządzania technologiami i odnosi się do takich atrybutów technologii, jak: zmiany możliwości technologii, szybkość zastępowania starej technologii przez nową, zasięg upowszechniania technologii, prawdopodobieństwo i czas pojawienia się nowych, przełomowych technologii.

Foresight, jako „sztuka i nauka antycypowania przyszłości”⁸⁸, rozwinął się z prognozowania technologicznego. Podręcznikowa⁸⁹ definicja określa foresight technologiczny za B. Martinem⁹⁰ jako „proces zaangażowany w systematyczne próby spojrzenia na długoterminową przyszłość nauki, technologii gospodarki oraz społeczeństwa, mający na celu identyfikację obszarów badań strategicznych oraz powstających technologii generycznych, które mają potencjał przyniesienia najwyższych korzyści”. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego uściśla, że: „foresight jest procesem kreowania kultury myślenia społeczeństwa o przyszłości, w którym zarówno naukowcy, inżynierowie, jak przedstawiciele przemysłu czy pracownicy administracji publicznej biorą udział w wyznaczaniu strategicznych kierunków rozwoju badań i rozwoju technologii w celu przysporzenia jak największych korzyści ekonomicznych i społecznych w gospodarce.”⁹¹ Za L.J. Jasińskim⁹² należy podkreślić, że foresight zakłada „aktywne budowanie obrazu przyszłości”, co określone zostało przez I. Nowicką⁹³ jako nie tylko rozpoznawanie przyszłych zdarzeń, lecz także wpływanie na nie. W literaturze dyskusję na temat różnic między foresightem technologicznym a prognozowaniem technologicznym odnaleźć można między innymi w podręczniku foresightu technologicznego⁹⁴

⁸⁷ K. Santarek (2016), *Prognozowanie rozwoju nowych technologii*, w: J. Lipski, K. Santarek, A. Świć, W. Piekarski, A. Dudziak, M. Stoma, A. Paszek, P. Wittbrodt, *Innowacyjne technologie w inżynierii produkcji*, Politechnika Lubelska, s. 12.

⁸⁸ D. Loveridge (2008), *Foresight: The Art and Science of Anticipating the Future*, Routledge.

⁸⁹ UNIDO (2008), *Foresight technologiczny*, podręcznik, t. 1, *Organizacja i metody*, UNIDO-PARP, Warszawa, https://www.parp.gov.pl/images/PARP_publications/pdf/2007_for_tech_t1e3r45-ju76.pdf [2.07.2018].

⁹⁰ B. Martin (1995), *Foresight in Science and Technology*, „Technology Analysis and Strategic Management” 7(2): 139–168.

⁹¹ Definicja Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, strona internetowa Narodowego Programu Foresight, <http://kbn.icm.edu.pl/foresight/definicja.html> [2.07.2018].

⁹² L.J. Jasiński, (2007), *Myślenie perspektywiczne. Uwarunkowania badania przyszłości typu foresight*, Instytut Nauk Ekonomicznych PAN, Warszawa.

⁹³ I. Nowicka (2004), *Spoleczne przewidywanie*, „Forum Akademickie” 07–08.

⁹⁴ UNIDO, *Foresight technologiczny...*, op. cit.

oraz w pracach: K. Halickiej⁹⁵, J. Łuniarńskiego⁹⁶, B.R. Martina⁹⁷, Ł. Nazarki⁹⁸, I. Milesa⁹⁹.

Future-Oriented Technology Assessment, określona w pracy K. Halickiej¹⁰⁰ jako prospektywna ocena technologii, jest szczególną formą oceny technologii, która koncentruje się przede wszystkim na zarządzaniu innowacjami w odniesieniu do pojawiających się technologii¹⁰¹. Zorientowana na przyszłość ocena technologii, mierząca się ze spekulatywnym charakterem dostępnych informacji, określa-na jest przez C. Cagnina i in.¹⁰² jako „wyobrażeniowa projekcja aktualnej wiedzy”. Jej zadaniem jest umożliwienie poznania złożonych systemów technologicznych i ich przemian oraz opracowanie reakcji na nie. FTA jest terminem „parasolowym”, który obejmuje metody analizy technologii z zakresu prognozowania technologicznego, foresightu technologicznego oraz oceny technologii¹⁰³.

Całościowa, wielowymiarowa analiza zaawansowanych, wzajemnie powiązanych technologii w obliczu wyzwań społecznych, ekonomicznych, środowiskowych jest zadaniem trudnym, a jednocześnie niezbędnym, aby skutecznie zarządzać technologiami. Waga problemu i jego interdyscyplinarny charakter znalazły odzwierciedlenie w opracowaniu bardzo różnych podejść, metod i narzędzi analizy technologii. Priorytetyzacja technologii jest elementem wielu metod analizy technologii, niekiedy jest też traktowana jako samodzielna metoda¹⁰⁴. Danymi procesu priorytetyzacji mogą być wyniki innych niezależnych metod analizy technologii. Ideę i miejsce priorytetyzacji technologii w portfelu metod analizy technologii zawarto w rozdziale 1.3. W rozdziale 1.2 przedsta-

⁹⁵ K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii...*, op. cit.

⁹⁶ J. Łunarski, *Zarządzenie technologiami...*, op. cit.

⁹⁷ B.R. Martin (2010), *The origins of the concept of 'foresight' in science and technology: An insider's perspective*, "Technological Forecasting and Social Change" 77(9):1438–1447, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.009>.

⁹⁸ Ł. Nazarko (2017), *Future-Oriented Technology Assessment*, 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, "Procedia Engineering" 182: 504–509, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.144>; Ł. Nazarko (2011), *Istota foresightu i jego percepcja w Polsce*, „Optimum. Studia Ekonomiczne” 4(52): 225–234.

⁹⁹ I. Miles (2008), *From Futures to Foresight*, w: L. Georghiou, J.C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper (red.), *The Handbook of Technology Foresight. Concepts and Practice*, Edward Elgar Publishing Limited, USA.

¹⁰⁰ K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii...*, op. cit.

¹⁰¹ Ł. Nazarko, *Future-Oriented Technology...*, op. cit.

¹⁰² C. Cagnin, A. Havas, O. Saritas (2013), *Future-oriented technology analysis: Its potential to address disruptive transformations*, "Technological Forecasting & Social Change" 80(3): 379–385, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.001>.

¹⁰³ C. Cagnin, A. Havas, O. Saritas, *Future-oriented technology...*, op. cit.

¹⁰⁴ A. Magruk (2012), *Hybrydowa metodyka badawcza foresightu technologicznego*, autoreferat rozprawy doktorskiej, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, s. 10, http://www.nazarko.pl/public/data/resource/upload/00003/2464/file/a_magruk_hybrydowa_metodyka_badawcza_foresightu_tehnologicznego_autoreferat_rozprawy_doktorskiej.pdf [11.07.2018].

wiono wyniki przeglądu literatury z zakresu dotychczasowego wykorzystywania w analizie i ocenie technologii metod zintegrowanych w proponowanym hybrydowym modelu priorytyzacji technologii w warunkach niepewności: metod zbiorów przybliżonych i metody *Data Envelopment Analysis*.

1.2. Zbiory przybliżone i metoda *Data Envelopment Analysis* w ocenie technologii – przegląd literatury

Problem oceny technologii jest tematem wielu inicjatyw. Badania z zakresu oceny technologii wykonują zarówno instytucje państwowe, jak i niezależne jednostki badawcze, prowadzące analizy na zlecenie agend państwowych¹⁰⁵. Ocena technologii przeprowadzana jest też w sektorze prywatnym na potrzeby przedsiębiorstw komercyjnych¹⁰⁶.

Wśród licznych wskazywanych funkcji oceny technologii wymienić można między innymi¹⁰⁷:

- kształtowanie świadomości społecznej w zakresie nowych technologii i stymulowanie debaty publicznej w sprawach nauki i techniki;
- wspomaganie zarządzania ewentualnymi konfliktami na tle technologicznym;
- promowanie społecznej odpowiedzialności biznesu i naukowców;
- generowanie i hierarchizacja przyszłościowych obszarów działalności badawczej;
- wskazywanie obszarów finansowania prac badawczo-rozwojowych (B+R);
- wspomaganie procesów rozwoju pożądaných technologii;
- wspomaganie procesów upowszechniania technologii;
- implementacje i ewaluacje innowacji technologicznych.

Ocena technologii jest dziedziną, która rozwija się dynamicznie, co znajduje odzwierciedlenie w stale rosnącej liczbie publikacji z tego obszaru. W bazach *Web of Science* (WoS) dla hasła: *technology analysis, technology assessment, technology foresight, technology forecasting, technology evaluation* w latach 1965–2018 indeksowanych jest 9934 rekordów, większość z nich dotyczy *technology assessment* – 7741. Wolumen publikacji w latach 1990–2017 przedstawia wykres na rysunku 1.3.

¹⁰⁵ M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.), *Technology Assessment...*, op. cit., s. 9.

¹⁰⁶ J. Łunarski, *Zarządzenie technologiami...*, op. cit.

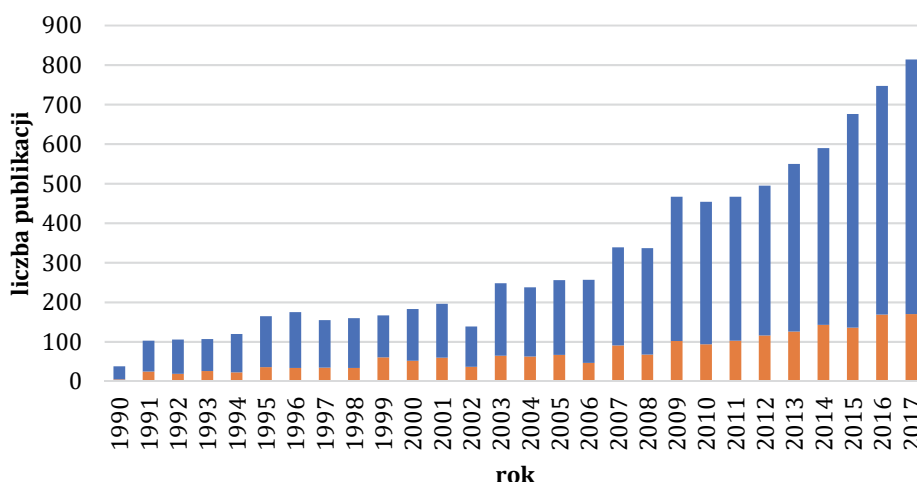
¹⁰⁷ P. Stankiewicz (2015), *Klasyczna i partycypacyjna ocena technologii*, w: M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43): s. 35–54; B. Poteralska, *Metodyka wspomagania...*, op. cit., s. 140; K.F. Mulder, J.N. Quist (red.) (2004), *Technology Assessment: Technology, Society, Sustainability*, Delft University of Technology, s. 9.

Wśród publikacji dotyczących oceny technologii najwięcej związanych jest z medycyną i technologiami medycznymi. Do nauk medycznych¹⁰⁸ można zaliczyć ponad 60% z 14790 obszarów problemowych zakwalifikowanych do 206 kategorii WoS, podejmowanych we wspomnianych 7741 indeksowanych publikacjach dotyczących *technology assessment*. Znacząco reprezentowane są także nauki ścisłe inżynieryjno-techniczne¹⁰⁹ – 11%, ale też szeroko definiowane ekonomia i zarządzanie¹¹⁰ – ok. 11%. Wyróżnić można także publikacje z dziedziny nauk biologiczno-chemicznych – ok. 5% i nauk o środowisku – ok. 5%.

¹⁰⁸ Kategorie WoS zaliczone do nauk medycznych: health care sciences services, health policy services, public environmental occupational health, medical informatics, medicine general internal, clinical neurology, pharmacology pharmacy, radiology nuclear medicine medical imaging, oncology, surgery, medicine research experimental, obstetrics gynecology, psychiatry, cardiac cardiovascular systems, rehabilitation, genetics heredity, critical care medicine, anesthesiology, orthopedics, pediatrics, respiratory system, gastroenterology hepatology, nursing, dentistry oral surgery medicine, endocrinology metabolism, medical laboratory technology, urology nephrology, peripheral vascular disease, toxicology, hematology, pathology, immunology, nutrition dietetics, ophthalmology, primary health care, medical ethics, medicine legal, infectious diseases, otorhinolaryngology, rheumatology, geriatrics gerontology, physiology, psychology clinical, chemistry medicinal, dermatology, integrative complementary medicine, substance abuse, emergency medicine, gerontology, transplantation, tropical medicine, veterinary sciences, anatomy morphology, allergy, parasitology, andrology, audiology speech language pathology.

¹⁰⁹ Kategorie WoS zaliczone do nauk inżynieryjnych i technicznych: engineering electrical electronic, computer science interdisciplinary applications, computer science information systems, engineering multidisciplinary, engineering industrial, information science library science, optics, computer science theory methods, engineering chemical, engineering aerospace, physics applied, computer science artificial intelligence, telecommunications, materials science multidisciplinary, engineering mechanical, imaging science photographic technology, computer science cybernetics, mathematical computational biology, engineering civil, engineering manufacturing, automation control systems, computer science software engineering, nuclear science technology, thermodynamics, food science technology, acoustics, construction building technology, meteorology atmospheric sciences, robotics, computer science hardware architecture, materials science characterization testing, metallurgy metallurgical engineering, transportation science technology, remote sensing, cell tissue engineering, electrochemistry, engineering marine, mechanics, materials science ceramics, physics multidisciplinary, astronomy astrophysics, geosciences multidisciplinary, physics condensed matter, materials science composites, mathematics interdisciplinary applications, plant sciences, engineering petroleum, polymer science, materials science coatings films, physics nuclear, crystallography, mathematics, physics fluids plasmas, spectroscopy.

¹¹⁰ Kategorie WoS zaliczone do ekonomii i zarządzania: economics, planning development, business, management, operations research management science, public administration, education educational research, law, international relations, communication, education scientific disciplines, statistics probability, agronomy, ergonomics, business finance, transportation, urban studies, architecture, area studies, industrial relations labor, social work, psychology educational.



Rysunek 1.3. Dynamika zmian liczby publikacji z obszaru analizy i oceny technologii

Źródło: opracowanie własne na podstawie baz WoS: TOPIC:(“technology analysis”) OR TOPIC:(“technology assessment”) OR TOPIC:(“technology foresight”) OR TOPIC:(“technology forecasting”) OR TOPIC:(“technology evaluation”).

Oprócz propozycji lub sprawozdań z realizacji konkretnych analiz technologii z różnych obszarów tematem zainteresowań badaczy była też klasyfikacja i systematyka przeprowadzonych projektów oceny technologii. Przegląd metod i narzędzi oceny technologii, dokonany na podstawie recenzji około 200 artykułów z lat 1970–2007, publikowanych w czasopismach, takich jak na przykład *Technological Forecasting and Social Change*, *International Journal of Technology Management* czy *IEEE Transactions on Engineering Management*, przedstawili T.A. Tran i T. Daim¹¹¹. Wyróżnili oni podejścia do oceny technologii w domenie publicznej oraz w organizacjach biznesowych i wyodrębnili metody w nich stosowane. W literaturze przywoływane¹¹² są też często formy oceny technologii wyłonione przez J. van den Ende i in.¹¹³: zwiększająca świadomość, strategiczna, konstruktywna i prognozująca wstecznie.

Zespół badawczy pod kierunkiem K. Klincewicz¹¹⁴ dokonał przeglądu prac pod względem kryteriów oceny technologii. Została wyróżniona ocena tech-

¹¹¹ T.A. Tran, T. Daim, *A taxonomic review...*, op. cit.

¹¹² B. Poteralska, *Metodyka wspomaganie...*, op. cit., s. 83; T. Daim, N. Gerdri, N. Basoglu (2011), *Technology Assessment: Forecasting Future Adoption of Emerging Technologies*, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG. Berlin, s. 2.

¹¹³ J. van den Ende, K. Mulder, M. Knot, E. Moors, P. Vergragt (1998), *Traditional and Modern Technology Assessment: Toward a Toolkit*, “Technological Forecasting and Social Change” 58(1–2): 5–21, [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(97)00052-8).

¹¹⁴ K. Klincewicz, A.H. Jasiński, A. Manikowski (2012), *Przegląd metod i kryteriów rankingowania technologii*. Ekspertyza wykonana w ramach Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki”, Radom – Warszawa.

nologii ze względu na aspekt techniczny, do którego zaliczono model TRL¹¹⁵ (ang. *Technology Readiness Levels*), wykorzystujący poziom dojrzałości oraz ze względu na aspekt biznesowy obejmujący techniki QFD¹¹⁶ (ang. *Quality Function Deployment*), i model *Technology Assessment Template*¹¹⁷. Dodatkowo do ukierunkowanych ocen technologii zaliczono model oceny etycznej eTA¹¹⁸ (ang. *ethical Technology Assessment*) oraz model oceny ekologicznych technologii autorstwa Li, Liu, Tana i Du¹¹⁹. W pracy zidentyfikowano również wieloaspektowe modele oceny technologii: model Hsu, Tzenga i Shyu¹²⁰, model Jolly'ego¹²¹, model De Coster i Butlera¹²², model Chena, Chunga i Weia¹²³, model Luchenga, Xina i Wenguanga¹²⁴, model Shena, Lina i Tzenga¹²⁵ czy model Łunarskiego¹²⁶.

W literaturze opracowane są też zestawienia propozycji metod i podejść dydaktycznych ocenie konkretnych technologii. W obszarze technologii medycz-

¹¹⁵ Opracowana przez NASA w latach siedemdziesiątych XX w. (za: J. Banke (2010), *Technology Readiness Levels Demystified*, NASA, https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html [12.1.2019]), formalnie zdefiniowana w 1989 r., w: S.R. Sadin, F.P. Povinelli, R. Rosen (1989), *The NASA technology push towards future space mission systems*, "Acta Astronautica" 20: 73-77, [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(89\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(89)90054-4).

¹¹⁶ K. Kim, K. Park, S. Seo (1997), *A matrix approach for telecommunications technology selection*, "Computers & Industrial Engineering" 33(3-4): 833-836. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00260-X).

¹¹⁷ R.J. van Wyk (2009), *Technology assessment for portfolio managers*, "Technovation" 30(4): 223-228, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.06.005>.

¹¹⁸ E. Palm, S.O. Hansson (2006), *The case for ethical technology assessment (eTA)*, "Technological Forecasting & Social Change" 73: 543-558, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.06.002>.

¹¹⁹ C. Li, F. Liu, X. Tan, Y. Du (2010), *A methodology for selecting a green technology portfolio based on synergy*, "International Journal of Production Research" 48(24): 7289-7302, <https://doi.org/10.1080/00207540903382857>.

¹²⁰ Y.-G. Hsu, G.-H. Tzeng, J.Z. Shyu (2003), *Fuzzy multiple criteria selection of government-sponsored frontier technology R&D projects*, "R&D Management" 33(5): 539-551, <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00315>.

¹²¹ D.R. Jolly (2008), *Chinese vs. European views regarding technology assessment: Convergent or divergent?*, "Technovation" 28(12): 818-830, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2008.09.001>.

¹²² R. De Coster, C. Butler (2005), *Assessment of proposals for new technology ventures in the UK: characteristics of university spin-off companies*, "Technovation" 25: 535-543, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2003.10.002>.

¹²³ C.-J. Chen, M.-C. Chung, C.-H. Wei (2006), *Government policy of technology selection for advanced traveler information systems*, "R&D Management" 36(4): 439-450, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2006.00445.x>.

¹²⁴ H. Lucheng, L. Xin, L. Wenguang (2010), *Research on emerging technology selection and assessment by technology foresight and fuzzy consistent matrix*, "Foresight" 12(2): 77-89, <https://doi.org/10.1108/14636681011035762>.

¹²⁵ Y.-C. Shen, G.T.R. Lin, G.-H. Tzeng (2011), *Combined DEMATEL techniques with novel MCDM for the organic light emitting diode technology selection*, "Expert Systems with Applications" 38: 1468-1481, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.056>.

¹²⁶ J. Łunarski, *Zarządzanie technologiami...*, op. cit.

nych E.A. Rehfuss i in.¹²⁷ zaproponowali trzy podejścia (*a priori*, etapowe i iteracyjne) i dwa typy (oparte na systemach i procesach). P. Weichbroth i C. Orłowski¹²⁸ dokonali przeglądu kryteriów oceny tylko technologii informatycznych – oprogramowania.

Wyniki przeglądu literatury z zakresu oceny technologii oraz wykorzystanych w hybrydowym modelu zbiorów przybliżonych wskazują, że ich trzy podstawowe zastosowania to: (i) wspomaganie procesu poprzez redukcję i eliminację nieścisłości oraz redundancji, (ii) odkrywanie zależności pomiędzy obiektami, atrybutami i generowanie reguł decyzyjnych oraz (iii) nadawanie wag atrybutom na podstawie określenia istotności danego atrybutu. Tym samym wykorzystywane są jako narzędzia (technologie) eksploracji wiedzy (ang. *data mining technology*) czy szerzej – technologii wiedzy (ang. *knowledge technology*).

Przedstawiając w ujęciu chronologicznym przykłady aplikacji wykorzystujących wymienione funkcje, można przytoczyć pracę W.-G. Lu i in.¹²⁹, którzy w swoim artykule zaproponowali system oceny nowych technologii na podstawie określonego przez panel ekspertów ich potencjału komercyjnego. Zbiory przybliżone zostały wykorzystane do zredukowania zbioru kryteriów, ale też do określenia wag wybranych atrybutów. Czteroetapowa procedura obejmowała: (i) określenie zmiennych oceny, (ii) zmniejszenie liczby kryteriów, (iii) obliczenie istotności kryteriów oraz (iv) podanie końcowego wyniku. Zdaniem autorów takie podejście wyeliminowało subiektywność i losowość oceny.

Z kolei S. Li i in.¹³⁰ zastosowali zbiory przybliżone przy analizie danych historycznych dotyczących wdrożenia szczupłej produkcji (ang. *lean production*) i wyjaśnienia związku między pomyślnym wdrożeniem a wykorzystanymi narzędziami i ich istotnością.

Celem artykułu Y.-H. Tsai i in.¹³¹ było zbadanie następujących kwestii: relacji zaufania między partnerami, motywacji do tworzenia sojuszy B+R oraz dylema-

¹²⁷ E.A. Rehfuss, A. Booth, L. Brereton, J. Burns, A. Gerhardus, K. Mozygemba, W. Oortwijn, L.M. Pfadenhauer, M. Tummers, G.-J. van der Wilt, A. Rohwer (2018), *Towards a taxonomy of logic models in systematic reviews and health technology assessments: A priori, staged, and iterative approaches*, "Research Synthesis Methods" 9(1): 13–24, <https://doi.org/10.1002/jrsm.1254>.

¹²⁸ P. Weichbroth, C. Orłowski (2009), *Przegląd miar oceny oprogramowania*, w: W. Chmielarz, T. Parys (red.), *Technologie informacyjne dla społeczeństwa*, Wyższa Szkoła Ekonomiczno-Informatyczna, Exit, Warszawa, s. 275–284, http://www.academia.edu/9674920/Prze%C4%85d_miar_oceny_oprogramowania [1.1.2019].

¹²⁹ W.-G. Lu, L.-C. Huang, J.-W. Wang (2007), *The new technology evaluation based on Rough-Set theory*, PICMET '07 - 2007 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology: 883–886, <https://doi.org/10.1109/PICMET.2007.4349405>.

¹³⁰ S. Li, C. Wu, H. Zhang (2009), *Key technology analysis of implementing lean production*, "IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management" 1–2: 1993–1996, <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344259>.

¹³¹ Y.-H. Tsai, W.-H. Lai, P.-L. Chang, J. Watada (2009), *Dilemma of Behavioral Uncertainty of R&D Alliance in Taiwan Machinery Industry*, "IEEE International Conference On Fuzzy Systems" 1–3:

tów z nimi związanych w tajwańskim przemyśle maszynowym. W tym zadaniu zbiory przybliżone zostały wykorzystane do redukcji oraz wyjaśnienia wpływu czynników i znalezienia kluczowych spośród nich.

Zastosowanie zbiorów przybliżonych do indukcji reguł decyzyjnych, aby odnaleźć zasady w działalności badawczo-rozwojowej i innowacyjnej, przedstawili C.-H. Wang i in.¹³² Wykorzystując analizę taksonomiczną przypadków wyodrębniono kryteria, na podstawie których opracowano reguły decyzyjne i przedstawiono je w postaci grafu. Zdaniem autorów wartość aplikacyjna zaprezentowanego rozwiązania przejawia się w możliwości wykorzystania go zarówno do predykcji, jak też do opracowania strategii rozwojowych i zarządzania. W tej samej funkcji, wyodrębnienia reguł mogących stanowić punkt odniesienia dla decydentów, zbiory przybliżone zostały zastosowane w pracy L. Jian i in.¹³³ przy wyborze regionalnej kluczowej technologii. Również do odkrycia związków pomiędzy inwestycjami, innowacjami a konkurencyjnością zbiory przybliżone wykorzystali P. van Hemert i P. Nijkamp¹³⁴. Tematem pracy było sprawdzenie, w jakim zakresie systemy wsparcia i interwencje publiczne odgrywają rolę w stymulowaniu inicjatyw innowacyjnych i mają wpływ na wydajność i konkurencyjność przemysłu.

Praca C. Ciflikli i E. Kahya-Ozyirmidokuz¹³⁵ to klasyczny przykład posłużenia się teorią zbiorów przybliżonych do redukcji liczby rozważanych zmiennych na etapie przetwarzania wstępnego danych w celu określenia i zwiększenia skuteczności kontroli jakości w produkcji wyrobów tekstylnych – dywanów. H.-Y. Wu i in.¹³⁶ wykorzystali zbiory rozmyte do identyfikacji, wśród propozycji zgłoszonych w badaniach kwestionariuszowych, kluczowych czynników wpływających na jakość e-learningu, które można jednocześnie wykorzystać do poprawy jakości tych usług. Poza zbiorami przybliżonymi wykorzystali QFD i szarą analizę relacyj-

439–1444, <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2009.5277145>.

¹³² C.-H. Wang, Y.-C. Chin, G.-H. Tzeng (2010), *Mining the R&D innovation performance processes for high-tech firms based on rough set theory*, "Technovation" 30 (7–8): 447–458, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.11.001>.

¹³³ L. Jian, S. Liu, Y. Liu (2010), *The Selection of Regional Key Technology Based on the Hybrid Model of Grey Fixed Clustering and Variable Precision Rough Set*, ISTASC'10 Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Systems theory and scientific computation: 54–59.

¹³⁴ P. van Hemert, P. Nijkamp (2010), *Knowledge investments, business R&D and innovativeness of countries: A qualitative meta-analytic comparison*, "Technological Forecasting and Social Change" 77(3): 369–384, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.08.007>.

¹³⁵ C. Ciflikli, E. Kahya-Ozyirmidokuz (2012), *Enhancing product quality of a process*, "Industrial Management & Data Systems" 112(8): 1181–1200, <https://doi.org/10.1108/02635571211264618>.

¹³⁶ H.-Y. Wu, H.-Y. Lin (2012), *A hybrid approach to develop an analytical model for enhancing the service quality of e-learning*, "Computers & Education" 58(4): 1318–1338, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.12.025>.

ną (ang. *grey relational analysis* – GRA). C. Lee i in.¹³⁷ w modelu oceny koncepcji nowych usług, zaprezentowanym na przykładzie gier wideo, sięgnęli po zbiory rozmyte do wyznaczania zakresów ocen na podstawie średniej geometrycznej w metodzie AHP. Z. Górny i in.¹³⁸ zaprezentowali metodykę budowy regułowej bazy wiedzy z wykorzystaniem zbiorów przybliżonych w celu uzyskania pożądaných własności parametrów obróbki cieplnej brązów. W podobnym zastosowaniu, do redukcji korelacji pomiędzy atrybutami, zbiory rozmyte zostały użyte przez X. Wang i in.¹³⁹ w ocenie efektywności technologii węglowych. Zdaniem autorów sprawiło to, że przetwarzane informacje stały się bardziej precyzyjne. Z kolei J.-L. Luo i Z.-H. Hu¹⁴⁰ dla opracowanego paradygmatu ryzyka innowacji technologicznych w spółdzielniach rolniczych zaproponowali model oceny ryzyka, wykorzystując jakoś klasyfikacji bazującą na wyprowadzonych na podstawie teorii zbiorów przybliżonych wartościach wag poszczególnych atrybutów.

X.T. Zeng i in.¹⁴¹ zastosowali zbiory przybliżone łącznie z rozmytymi w dziedzinie spotykanej funkcji modelowania niepewności lingwistycznej i odzwierciedlenia preferencji decydentów co do ryzyka w zarządzaniu ekosystemem. Natomiast X. Liang i M.P. van Dijk¹⁴² użyli ich do analizy czynników technologicznych i nietechnologicznych systemu zbierania wody deszczowej. X. Lai i in.¹⁴³ zaproponowali ramy systemu oceny innowacji w zakresie integracji technologii niskowęglowej z perspektywy zarządzania systemem. Zbiory przybliżone, w propozycji autorów, służą określeniu wag indeksów w zintegrowanym mode-

¹³⁷ C. Lee, H. Lee, H. Seol, Y. Park (2012), *Evaluation of new service concepts using rough set theory and group analytic hierarchy process*, "Expert Systems with Applications" 39: 3404–3412, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.028>.

¹³⁸ Z. Górny, S. Kluska-Nawarecka, D. Wilk-Kołodziejczyk, K. Regulski (2015), *Methodology for the Construction of a Rule-Based Knowledge Base Enabling the Selection of Appropriate Bronze Heat Treatment Parameters Using Rough Sets*, "Archives of Metallurgy Materials" 60(1): 309–312, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0050>.

¹³⁹ X. Wang, F. Jia, Y. Wang (2015), *Evaluation of Clean Coal Technologies in China: Based on Rough Set Theory*, "Energy & Environment" 26 (6–7): 985–995, <https://doi.org/10.1260/0958-305X.26.6-7.985>.

¹⁴⁰ J.-L. Luo, Z.-H. Hu (2015), *Risk paradigm and risk evaluation of farmers cooperatives' technology innovation*, "Economic Modelling" 44: 80–85, <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.10.024>.

¹⁴¹ X.T. Zeng, G.H. Huang, X.L. Yang, X. Wang, H. Fu, Y.P. Li, Z. Li (2016), *A developed fuzzy-stochastic optimization for coordinating human activity and eco-environmental protection in a regional wetland ecosystem under uncertainties*, "Ecological Engineering" 97: 207–230, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.09.002>.

¹⁴² X. Liang, M.P. van Dijk (2016), *Identification of Decisive Factors Determining the Continued Use of Rainwater Harvesting Systems for Agriculture Irrigation in Beijing*, "Water" 8(1), 7, <https://doi.org/10.3390/w8010007>.

¹⁴³ X. Lai, J.X. Liu, G. Georgiev (2016), *Low carbon technology integration innovation assessment index review based on rough set theory - an evidence from construction industry in China*, "Journal of Cleaner Production" 126: 88–96, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.035>.

lu. T.-A. Shiau i J.-K. Chuen-Yu¹⁴⁴ ocenili wpływ na społeczność farmy wiatrowej, przeprowadzając wstępną selekcję wskaźników zrównoważonego rozwoju za pomocą zbiorów przybliżonych. C. Bai i J. Sarkis¹⁴⁵ przedstawili wielokryterialny model oceny i wyboru przyjaznej dla środowiska technologii produkcji z wykorzystaniem między innymi teorii zbiorów przybliżonych i statystyki szarej. Zbiory przybliżone zostały użyte do określenia względnych wartości wag kryteriów oceny. Y. Gao i in.¹⁴⁶ na rzeczywistym przykładzie rolnych gospodarstw rodzinnych za pomocą zbiorów przybliżonych zredukowali liczbę analizowanych czynników wpływających na rozwój gospodarstwa zarówno w grupie zewnętrznych, jak i bezpośrednio dotyczących gospodarstwa. W wypadku pracy Y. He i in.¹⁴⁷ koncepcja zbiorów rozmytych służyła do określenia wag w systemie wskaźników oceny poziomu rozwoju wybranych krajów w zakresie „czystej” energii i promowania jej rozwoju. Wagi, podobnie jak w innych pracach wykorzystujących te możliwości zbiorów, ustalone zostały na podstawie ważności atrybutów warunkowych dla podejmowanej decyzji. S. Sharma i in.¹⁴⁸ posłużyli się rozmytymi przybliżonymi zbiorami w zadaniu eliminacji problemu nieprecyzyjności danych i zapewnienia efektywności dokonywanych w czasie rzeczywistym obliczeń w systemach zarządzania energią. Dodatkowym zastosowaniem było generowanie reguł decyzyjnych w wypadku nieoczekiwanych lub niejasnych sytuacji.

Systematykę przytoczonych prac dokonaną na podstawie oceny zastosowania zbiorów przybliżonych przedstawiono w tabeli 1.1. Natomiast szczegółowe podstawy teoretyczne wymienionych funkcji zbiorów przybliżonych zawiera rozdział 2.1.

¹⁴⁴ T.-A. Shiau, J.-K. Chuen-Yu (2016), *Developing an Indicator System for Measuring the Social Sustainability of Offshore Wind Power Farms*, „Sustainability” 8 (5), 470, <https://doi.org/10.3390/su8050470>.

¹⁴⁵ C. Bai, J. Sarkis (2017), *Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: Modeling the decision process*, „International Journal of Production Economics” 188: 86–104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.013>.

¹⁴⁶ Y. Gao, X. Zhang, L. Wu, S. Yin, J. Lu (2017), *Resource basis, ecosystem and growth of grain family farm in China: Based on rough set theory and hierarchical linear model*, „Agricultural Systems” 154: 157–167, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.013>.

¹⁴⁷ Y. He, Y. Pang, Q. Zhang, Z. Jiao, Q. Chen (2018), *Comprehensive evaluation of regional clean energy development levels based on principal component analysis and rough set theory*, „Renewable Energy” 122: 643–653, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.028>.

¹⁴⁸ S. Sharma, A. Dua, M. Singh, N. Kumar, S. Prakash (2018), *Fuzzy rough set based energy management system for self-sustainable smart city*, „Renewable & Sustainable Energy Reviews” 82: 3633–3644, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.099>.

Tabela 1.1. Zbiory przybliżone w zadaniach oceny technologii

Zastosowanie	Autorzy (rok)	Problem/przedmiot analizy
Redukcja kryteriów oceny	W.-G. Lu, L.-C. Huang i J.-W. Wang (2007)	system oceny nowych technologii
	Y.-H. Tsai, W.-H. Lai, P.-L. Chang i J. Watada (2009)	dylematy partnerstwa B+R w tajwańskim przemyśle maszynowym
	H.-Y. Wu i H.-Y. Lin (2012)	jakość e-learningu
	C. Ciflikli i E. Kahya-Ozyirmidokuz (2012)	jakość w produkcji dywanów
	X. Wang, F. Jia i Y. Wang (2015)	efektywność technologii węglowych
	Y. Gao, X. Zhang, L. Wu, S. Yin i J. Lu (2017)	rozwój gospodarstw rodzinnych
	S. Sharma, A. Dua, M. Singh, N. Kumar i S. Prakash (2018)	systemy zarządzania energią
Indukcja reguł decyzyjnych	Y.-H. Tsai, W.-H. Lai, P.-L. Chang i J. Watada (2009)	dylematy partnerstwa B+R w tajwańskim przemyśle maszynowym
	C.-H. Wang, Y.-C. Chin i G.-H. Tzeng (2010)	działalność B+R i innowacyjna przedsiębiorstw zaawansowanych technologii
	P. van Hemert i P. Nijkamp (2010)	działalność B+R i innowacyjna krajów
	L. Jian, S. Liu i Y. Liu (2010)	wybór regionalnej kluczowej technologii
	C. Ciflikli i E. Kahya-Ozyirmidokuz (2012)	jakość w produkcji dywanów
	Z. Górny, S. Kluska-Nawarecka, D. Wilk-Kołodziejczyk i K. Regulski (2015)	parametry obróbki cieplnej brązów
	X. Liang i M.P. van Dijk (2016)	system zbierania wody deszczowej
	T.-A. Shiau i J.-K. Chuen-Yu (2016)	wpływ farmy wiatrowej
S. Sharma, A. Dua, M. Singh, N. Kumar i S. Prakash (2018)	systemy zarządzania energią	
Określenie wag	W.-G. Lu, L.-C. Huang i J.-W. Wang (2007)	system oceny nowych technologii
	S. Li, C. Wu i H. Zhang (2009)	wdrożenie szczupłej produkcji
	C. Lee, H. Lee, H. Seol i Y. Park (2012)	ocena koncepcji usług (gry wideo)
	J.-L. Luo i Z.-H. Hu (2015)	ryzyko innowacji technologicznych w spółdzielniach rolniczych

Zastosowanie	Autorzy (rok)	Problem/przedmiot analizy
Określenie wag	X. Lai, J.X. Liu i G. Georgiev (2016)	integracja technologii niskowęglowej
	C. Bai i J. Sarkis (2017)	hipotetyczna technologia produkcji
	Y. He, Y. Pang, Q. Zhang, Z. Jiao i Q. Chen (2018)	poziom rozwoju wybranych krajów w zakresie czystej energii
Modelowanie niepewności lingwistycznej	X.T. Zeng, G.H. Huang, X.L. Yang, X. Wang, H. Fu, Y.P. Li i Z. Li (2016)	zarządzanie regionalnym ekosystemem

Źródło: opracowanie własne.

Przegląd prac wskazuje na stosunkowo rzadkie wykorzystanie zbiorów przybliżonych w zadaniach zorientowanej na przyszłość oceny technologii. Cytowane rozwiązania obejmują oceny produktów wdrożonych technologii, organizacji stosujących dane technologie bądź ocenę samej technologii, ale z perspektywy wybranych aspektów.

Wśród aplikacji modeli DEA prace dotyczące *stricte* technologii, w znaczeniu przedstawionym w rozdziale 1.1, dyfundują w zbiorze publikacji dotyczących DEA ze względu na fakt, że w nomenklaturze metody DEA przyjęto określenie „technologia” jako opis wektora cech dowolnych obiektów ewaluowanych za pomocą metody¹⁴⁹. Tym samym, oceniając jednostkę, ocenia się jej technologię. Dotychczasowe zastosowanie DEA w analizie *sensu stricto* technologii dotyczy przede wszystkim oceny efektywności wybranych technologii, co wynika z możliwości uwzględnienia w DEA kryteriów, których wzrost wartości oceniany jest jako niepożądany, a jednocześnie niemożliwy do całkowitego wyeliminowania (odpady, zanieczyszczenia, tj. na przykład emisja gazów cieplarnianych i in.)¹⁵⁰. W tym

¹⁴⁹ B. Guzik, *Podstawowe modele DEA...*, op. cit.; B. Guzik (2009), *Podstawowe możliwości analityczne modelu CCR-DEA*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 19(1): 55–75.

¹⁵⁰ E. Chodakowska (2018), *Rough and fuzzy DEA in the process of prospective technology analysis*, w: A. Emrouznejad, E. Thanassoulis (red.), *Data Envelopment Analysis and Performance Measurement: Recent Developments: Proceedings of the DEA40: International Conference of Data Envelopment Analysis*, Aston Business School, UK: 133–142.

kontekście przywołać można prace: J.-L. Fan i in.¹⁵¹, D.S. Kwon i in.¹⁵², Y. Liu i in.¹⁵³, T. Sueyoshi i M. Goto¹⁵⁴, A. Shabani i in.¹⁵⁵

Pozostałe zastosowania to między innymi ustalanie priorytetów badawczo-rozwojowych¹⁵⁶ przy uwzględnieniu zasobów B+R¹⁵⁷, ocena istniejących i stosowanych technologii¹⁵⁸ oraz prognozowanie technologiczne¹⁵⁹. Zestawienie

¹⁵¹ J.-L. Fan, X. Zhang, J. Zhang, S. Peng (2015), *Efficiency evaluation of CO2 utilization technologies in China: A super-efficiency DEA analysis based on expert survey*, "Journal of CO2 Utilization" 11: 54–62, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.01.004>.

¹⁵² D.S. Kwon, J.H. Cho, S.Y. Sohn (2017), *Comparison of technology efficiency for CO2 emissions reduction among European countries based on DEA with decomposed factors*, "Journal of Cleaner Production" 151: 109–120, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.065>.

¹⁵³ Y. Liu, C. Sun, S. Xu (2013), *Eco-Efficiency Assessment of Water Systems in China*, "Water Resource Management" 27(14): 4927–4939, <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0448-3>.

¹⁵⁴ T. Sueyoshi, M. Goto (2014), *Environmental assessment for corporate sustainability by resource utilization and technology innovation: DEA radial measurement on Japanese industrial sectors*, "Energy Economics" 46: 295–307, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.021>.

¹⁵⁵ A. Shabani, R.F. Saen, S.M.R. Torabipour (2014), *A new data envelopment analysis (DEA) model to select eco-efficient technologies in the presence of undesirable outputs*, "Clean Technologies and Environmental Policy" 16(3): 513–525, <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0652-0>.

¹⁵⁶ K. Cuhls, T. Kuwahara (1994), *Outlook for Japanese and German future technology - comparing technology forecast surveys*. Heidelberg: Physica-Verlag ("Technology, Innovation and Policy"); H. Lee, C. Lee, H. Seol, Y. Park (2008), *On the R&D priority setting in technology foresight: a DEA and ANP approach*, "International Journal of Innovation and Technology Management" 5(2): 201–219, <https://doi.org/10.1142/S021987700800133>.

¹⁵⁷ S.K. Lee, G. Mogi, K.S. Hui (2013), *A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 21: 347–355, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.067>; P. Yu, J.H. Lee (2013), *A hybrid approach using two-level SOM and combined AHP rating and AHP/DEA-AR method for selecting optimal promising emerging technology*, "Expert System with Applications" 40: 300–314, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.043>.

¹⁵⁸ A. Alinezhad, A. Makui, R. Kiani Mavi, M. Zohrehbandian (2011), *An MCDM-DEA approach for technology selection*, "Journal of Industrial Engineering International" 7(12): 32–38; G.R. Amin, A. Emrouznejad (2013), *A new DEA model for technology selection in the presence of ordinal data*, "International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 65: 1567–1572, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4280-3>; R.F. Saen (2009), *Technology selection in the presence of imprecise data, weight restrictions, and nondiscretionary factors*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 41(7–8): 827–838, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1514-5>.

¹⁵⁹ T.R. Anderson, K. Hollingsworth, L. Inman (2001), *Assessing the rate of change in the enterprise database system market over time using DEA*, "Management of Engineering and Technology", PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol. 1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199), <https://doi.org/10.1109/PICMET.2001.951928>; O.L. Inman (2004), *Technology forecasting using data envelopment analysis*. PhD dissertation. Department of Engineering and Technology Management. Portland State University, <https://core.ac.uk/download/pdf/37776964.pdf> [3.11.2018]; O.L. Inman, T.R. Anderson, R.R. Harmon (2006), "Technological Forecasting & Social Change" 73: 1178–1187, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.013>; T.R. Anderson, T.U. Daim, J. Kim (2008), *Technology fore-*

wybranych prac wykorzystujących metodę DEA w zadaniach oceny technologii przedstawiono w tabeli 1.2.

Tabela 1.2. Metoda DEA w zadaniach oceny technologii

Zastosowanie	Autorzy (rok)	Problem/przedmiot analizy
Zrównoważony rozwój	Y. Liu, C. Sun i S. Xu (2013)	ekoefektywność systemów wodnych w Chinach
	T. Sueyoshi i M. Goto (2014)	oddziaływanie na środowisko innowacji technologicznych w gałęziach japońskiego sektora przemysłowego
	A. Shabani, R.F. Saen i S.M.R. Torabipour (2014)	selekcja optymalnych ekologicznie technologii wież chłodniczych w elektrowniach
	J.-L. Fan, X. Zhang, J. Zhang i S. Peng (2015)	technologie utylizacji CO ₂
	D.S. Kwon, J.H. Cho i S.Y. Sohn (2017)	kraje europejskie w zakresie technologii wytwarzania energii z odnawialnych źródeł z uwzględnieniem poziomu emisji CO ₂
Wybór technologii	K. Cuhls i T. Kuwahara (1994)	wyniki japońskiego i niemieckiego badania Delphi
	H. Lee, C. Lee, H. Seol i Y. Park (2008)	priorytety w zakresie B+R projektu foresightu technologicznego
	R.F. Saen (2009)	wybór robotów (dane: M. Khouja (1995) ¹⁶⁰)
	A. Alinezhad, A. Makui i R. Kiani Mavi, M. Zohrehbandian (2011)	wybór robotów (dane: E.E. Karsak, S.S. Ahiska (2005) ¹⁶¹)
	S.K. Lee, G. Mogi i K.S. Hui (2013)	zasoby B+R do strategii w odniesieniu do wysokich cen ropy naftowej
	G.R. Amin i A. Emrouznejad (2013)	wybór robotów (dane: E.E. Karsak, S.S. Ahiska (2005) ¹⁶²)
	P. Yu i J.H. Lee (2013)	wyłaniające się nanotechnologie

casting for wireless communication, "Technovation" 28(9): 602–614, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.12.005>; A. Lamb, T.R. Anderson, T.U. Daim (2010), *Difficulties in R&D Target-Setting Addressed through Technology Forecasting Using Data Envelopment Analysis*, "Technology Management for Global Economic Growth", PICMET 2010: 1–9.

¹⁶⁰ M. Khouja (1995), *The use of data envelopment analysis for technology selection*, "Computers & Industrial Engineering" 28(1): 123–132, [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)00032-1).

¹⁶¹ E.E. Karsak, S.S. Ahiska (2005), *Practical common weight multicriteria decision-making approach with an improved discriminating power for technology selection*, "International Journal of Production Research" 43(8): 1537–1554, <https://doi.org/10.1080/13528160412331326478>.

¹⁶² Ibidem.

Zastosowanie	Autorzy (rok)	Problem/przedmiot analizy
Prognozowanie technologiczne	A. Lamb, T.R. Anderson i T.U. Daim (2010)	cele B+R
	O.L. Inman, T.R. Anderson i R.R. Harmon (2006)	wprowadzanie samolotów bojowych
	T.R. Anderson, T.U. Daim i J. Kim (2008)	komunikacja bezprzewodowa

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Chodakowska (2018), *Rough and fuzzy DEA in the process of prospective technology analysis*, w: A. Emrouznejad, E. Thanassoulis (red.), *Data Envelopment Analysis and Performance Measurement: Recent Developments: Proceedings of the DEA40: International Conference of Data Envelopment Analysis*, Aston Business School, UK: 133–142.

Opublikowane aplikacje wskazują na zasadność i przydatność do oceny technologii zarówno metody DEA, jak i zbiorów przybliżonych. W literaturze łączenie zbiorów przybliżonych z metodą DEA jest stosunkowo mało popularne i rzadko stosowane. Narzędzia te zastosowano łącznie między innymi w następujących obszarach¹⁶³: prognozowanie niepowodzeń biznesowych¹⁶⁴, wydajność łańcucha dostaw¹⁶⁵, japoński sektor bankowy¹⁶⁶.

Zdaniem autorki zarówno zbiory przybliżone, jak i metoda DEA mają ogromny potencjał i otwierają nowe możliwości w dziedzinie zarządzania technologią. Jednakże temat oceny nowych technologii w kontekście badań nad przyszłością za pomocą wymienionych metod jest ciągle niedostatecznie eksploatowany w stosunku do ich możliwości (przedstawionych w rozdziale 2). W hybrydowym modelu priorytyzacji technologii zaproponowano wykorzystanie metod zbiorów przybliżonych w funkcji narzędzi pozwalających ograniczyć liczbę kryteriów analizy oraz modelować niespójność ocen eksperckich, zaś metodę DEA do estymacji optymalnych wag wyznaczonych kryteriów i budowy rankingu technologii. Postulowane rozwiązanie znacząco usprawnia proces oceny technologii oraz zwiększa obiektywność wyników.

¹⁶³ E. Chodakowska (2018), *Koncepcja analizy wyłaniających się technologii za pomocą metody DEA i zbiorów przybliżonych*, w: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t. 2, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 125–136, http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2018/T2/2018_t2_125.pdf [16.07.2018].

¹⁶⁴ J.J. Shuai, H.L. Li (2005), *Using Rough Set and Worst Practice DEA in Business Failure Prediction*, w: D. Ślęzak, J. Yao, J.F. Peters, W. Ziarko, X. Hu (red.), *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing*, RSFDGrC, "Lecture Notes in Computer Science" 3642. Springer, Berlin, Heidelberg, 503–510, https://doi.org/10.1007/11548706_53.

¹⁶⁵ J. Xu, B. Li, D. Wu (2009), *Rough data envelopment analysis and its application to supply chain performance evaluation*, "International Journal of Production Economics" 122(2): 628–638, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.026>.

¹⁶⁶ R.K. Shiraz, H. Fukuyama, M. Tavana, D. Di Caprio (2016), *An integrated data envelopment analysis and free disposal hull framework for cost-efficiency measurement using rough sets*, "Applied Soft Computing" 46: 204–219, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.043>.

1.3. Priorytetyzacja w metodach analizy technologii

Portfel metod analizy technologii jest bardzo obszerny i obejmuje zarówno modele kompleksowe, jak i realizujące tylko wybrane funkcje procesu, na przykład: eksploracji danych z baz danych bądź generowanie danych o technologiach, techniki pracy z ekspertami lub szerszymi grupami interesariuszy, techniki porządkowania informacji czy metody opracowywania wyników, w tym predykcji. Wymieniane w literaturze metody i koncepcje często uzupełniają się, kompensując swoje ograniczenia, bądź powielają zadania poprzez triangulację, zapewniając wyższą jakość badań. Rozważane metody bywają oryginalnymi propozycjami lub są tylko pochodnymi innych, wcześniej opracowanych modeli¹⁶⁷. Wśród nich są zarówno podejścia ściśle ukierunkowane na analizę technologii i specjalnie opracowane na potrzeby takich badań, jak i o bardziej uniwersalnym charakterze, będąc zapożyczonymi z innych dziedzin.

Typologia i klasyfikacja metod o potencjale ich wykorzystania w analizie i ocenie technologii jest tematem aktualnym i podejmowanym przez wielu badaczy. Podstawowy podział wykorzystywanych metod oceny technologii przedstawił między innymi A.L. Porter¹⁶⁸: opinie ekspertów i nieekspertów, monitoring, ekstrapolacja trendów, scenariusze, modelowanie ilościowe, modelowanie jakościowe, lista kontrolna, macierze. I. Miles i M. Keenan¹⁶⁹, zależnie od celu prowadzonych analiz, wyróżnili cztery grupy metod foresightu technologicznego: metody identyfikujące zagadnienie, metody eksploratywne, metody kreatywne oraz ustalanie priorytetów. Do ostatniej grupy zaliczyli metodę krytycznych (kluczowych) technologii oraz mapę drogową technologii. Jedną z najpopularniejszych przywoływanych w literaturze typologii w odniesieniu do foresightu (w tym foresightu technologicznego) jest „diament foresightu” (ang. *foresight diamond*) R. Poppera¹⁷⁰. Wyodrębnione 33 metody zostały zaliczone do ilościowych, jakościowych, mieszanych oraz według rodzaju i źródła wiedzy będącej ich podstawą: wynikających z kreatywności, opartych na wyobrażeniach lub dowodach, będących pochodną osobistego doświadczenia lub pojawiających się jako efekt interakcji. Według R. Poppera¹⁷¹ typologia metod foresightu technologicznego może również być wykonana na podstawie odniesienia do przyszłości:

¹⁶⁷ A.E. Gudanowska (2014), *Mapowanie technologii jako jedna z metod analizy technologii w świetle wybranych zagranicznych doświadczeń*, "Economics and Management" 1: 265–281, <http://dx.doi.org/10.12846/j.em.2014.01.16>.

¹⁶⁸ A.L. Porter (1995), *Technology Assessment*, "Impact Assessment" 13(2): 135–151, <https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726087>.

¹⁶⁹ I. Miles, M. Keenan (2003), *Overview of methods used in foresight*. The Technology Foresight for Organisers Training Course, Ankara, United Nations Industrial Development Organisation.

¹⁷⁰ R. Popper (2008), *Foresight methodology*, w: L. Georghiou, J.C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper (red.), *The Handbook of Technology Foresight. Concepts and Practice*, Edward Elgar Publishing Limited, USA.

¹⁷¹ Ibidem.

podział na techniki eksploratywne – jeśli wykorzystują to, co jest obecnie wiadome, oraz normatywne – jeśli bazują na przyszłych oczekiwaniach i potrzebach. Za podstawową klasyfikację może być też uznany podział na dwie grupy, którą zaproponowali R. Popper i W.B. Korte¹⁷²: metody „twarde” – wykorzystujące dane statystyczne, ilościowe (wskaźniki osiągnięć, krytyczna analiza wpływów) oraz metody „miękkie” (przegląd literatury, burza mózgów, panele, warsztaty, metoda delficka, budowa scenariuszy, skanowanie środowiskowe, analiza SWOT). Propozycją A. Stirlinga i in.¹⁷³, dedykowaną ocenie pod kątem zrównoważonego rozwoju, jest podział w dwóch wymiarach: metody otwierające/zamykające oraz szerokie/wąskie z dodatkowym rozróżnieniem na partycypacyjno-deliberatywne i ekspercko-analityczne. Autorskie grupowanie zidentyfikowanych 116 metod foresightu technologicznego, na podstawie zakodowanych ich cech za pomocą narzędzia analizy skupień, opisał A. Magruk¹⁷⁴. Wyłonił następujące klasy metod foresightu technologicznego: konsultatywną, kreatywną, normatywną, multikryterialną, radarową, symulacyjną, analityczną, przeglądową i strategiczną. Listę 192 potencjalnych podejść ilościowych, jakościowych i mieszanych oraz dla wybranych 90 typologię wraz z subiektywną oceną potencjału zastosowania w zorientowanej na przyszłość ocenie technologii zawiera praca K. Halickiej¹⁷⁵. Zwięzłe prezentacje 12 metod *stricte* matematycznych wraz z ich specyfikacją obejmuje praca K. Klincewicza i A. Manikowskiego¹⁷⁶.

Wprawdzie zbiór potencjalnych metod analizy technologii jest bardzo liczny i ciągle otwarty¹⁷⁷, w praktyce badań technologii wykorzystuje się przeciętnie konfigurację tylko kilku najprostszych metod¹⁷⁸, a wśród nich najczęściej stosowana jest metoda delficka¹⁷⁹. Triangulacja, rozumiana jako integracja różnych

¹⁷² R. Popper, W. Korte (2004), *XTREME EUFORIA: Combining Foresight Methods*, EU-US Seminar: New Technology Foresight, Forecasting & Assessment Methods, Sewilla 13–14.05. 2004.

¹⁷³ A. Stirling, M. Leach, L. Mehta, I. Scoones, A. Smith, S. Stagl, J. Thompson (2007), *Empowering Designs: towards more progressive appraisal of sustainability*, “STEPS Working Paper” 3, STEPS Centre, Brighton, http://steps-centre.org/wp-content/uploads/final_steps_design1.pdf [1.12.2018].

¹⁷⁴ A. Magruk (2011), *Innovative classification of technology foresight methods*, “Technological and Economic Development of Economy” 17(4): 700–715, <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2011.649912>.

¹⁷⁵ K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii...*, op. cit.

¹⁷⁶ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

¹⁷⁷ R. Szewczyk (red.), op. cit., s. 7.

¹⁷⁸ R. Popper (2008), *How are foresight methods selected?*, “Foresight” 10(6): 62–89, <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>; N. Li, K. Chen, M. Kou (2017), *Technology foresight in China: Academic studies, governmental practices and policy applications*, “Technological Forecasting and Social Change” 119: 246–255, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.010>.

¹⁷⁹ L. Proskuryakova (2017), *Energy technology foresight in emerging economies*, “Technological Forecasting and Social Change” 119: 205–210, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.024>; B. Förster (2015), *Technology foresight for sustainable production in the German automotive supplier industry*, “Technological Forecasting and Social Change” 92: 237–248, <https://doi.org/10.1016/>

rodzajów informacji i technik, jest wskazywana jako podejście o wyższej wartości użytkowej dla decydentów. Wieloaspektowa ocena z różnych perspektyw za pomocą uzupełniających się metod poprawia jakość badań, w pewnym stopniu eliminując słabe strony poszczególnych metod. Jednocześnie dobór konkretnych metod badawczych i ich konfiguracje są bardzo rzadko rzetelnie uzasadnione oraz wyjaśnione¹⁸⁰. W tabeli 1.3 zaprezentowano uporządkowaną alfabetycznie listę 25 metod, zidentyfikowanych jako najczęściej wykorzystywane na podstawie wykonanego przez R. Poppera¹⁸¹ przeglądu ponad 1000 studiów foresight wraz z krótkim opisem.

Tabela 1.3. Metody stosowane w ocenie technologii

<p>Analiza morfologiczna (ang. <i>Morphological Analysis</i>) Metoda heurystycznego poszukiwania rozwiązań problemów w trzech fazach. W stadium pierwszym określana jest dziedzina, zakres i treść problemu, w drugim analizuje się problem i identyfikuje jego niezależne elementy (wymiary), określając również atrybuty (warianty) poszczególnych wymiarów. W trzecim stadium budowana jest tablica morfologiczna podlegająca zredukowaniu, w wyniku którego otrzymuje się połączenia parametrów zasługujące na uwagę¹⁸².</p>
<p>Analiza SWOT (ang. <i>SWOT analysis</i>) Metoda polegająca na identyfikacji, a następnie klasyfikacji wszystkich zjawisk i stanów mających wpływ na rozwój przedmiotu analizy na cztery grupy wyodrębnione ze względu na skutek i pochodzenie: mocne (ang. <i>Strengths</i>) i słabe strony (ang. <i>Weaknesses</i>) oraz szanse (ang. <i>Opportunities</i>) i zagrożenia (ang. <i>Threats</i>)¹⁸³.</p>
<p>Analiza wielokryterialna (ang. <i>Multi-criteria analysis</i>) Obejmuje różnorodne techniki wielokryterialnych metod wspomagania decyzji, które można zgrupować w modele oparte na funkcji użyteczności oraz bazujące na modelu relacyjnym.</p>
<p>Analiza wpływów krzyżowych/Analiza strukturalna (ang. <i>Cross-impact/Structural analysis</i>) Metoda porządkowania i analizowania zbiorów obejmujących dużą liczbę zmiennych, które wzajemnie na siebie oddziałują, np. wystąpienie jednego zdarzenia zmienia prawdopodobieństwo zaistnienia innego. Polega na skonstruowaniu macierzy wpływów, w której w wierszach</p>

j.techfore.2014.09.010; M. Choi, H.-L. Choi, H. Yang (2014), *Procedural characteristics of the 4th Korean technology foresight*, "Foresight" 16(3): 198-209, <https://doi.org/10.1108/FS-11-2012-0087>.

¹⁸⁰ A. Magruk, *Innovative classification...*, op. cit.

¹⁸¹ R. Popper (2009), *Mapping Foresight Revealing how Europe and other world regions navigate into the future*, http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2009_efmn_mappingForesight_EU.pdf [8.10.2018].

¹⁸² Internetowa encyklopedia zarządzania, https://mfiles.pl/pl/index.php/Analiza_morfologiczna [13.10.2018].

¹⁸³ Pilotażowe badania typu foresight (2012), Biuletyn Informacyjny MCIG, <http://innowacyjnaradomka.pl/wp-content/uploads/2012/09/Pilota%C5%BCowe-badania-typu-foresight.pdf> [14.10.2018].

przedstawione są analizowane trendy, a w kolumnach wydarzenia, jakie mogą wystąpić. W miejscach przecięć kolumn z rzędami przedstawiane są na przykład: oceny eksperckie prawdopodobieństwa zajścia par zdarzeń i spodziewany efekt interakcji¹⁸⁴.

Bibliometria (ang. *Bibliometrics*)

Metody matematyczne i statystyczne znajdujące zastosowanie w literaturze naukowej (a także w odniesieniu do patentów i innych środków przekazywania informacji). Pozwalają one na ocenę wielkości „produkcji naukowej” w oparciu o założenie, że istotą działalności naukowej (B+R) jest produkcja „wiedzy” znajdująca swoje odzwierciedlenie w literaturze naukowej¹⁸⁵.

Burze mózgów (ang. *Brainstorming*)

Metoda grupowego rozwiązywania problemów przez stymulowanie twórczego, oryginalnego myślenia i intensywnego wytwarzania pomysłów przez grupę ludzi. Polega na sformułowaniu problemu, a następnie generowaniu przez uczestników pomysłów jego rozwiązania¹⁸⁶.

Drzewa odniesień/uwarunkowań (ang. *Relevance trees*)

Technika analityczna, która dzieli szeroki temat na coraz mniejsze podtematy, pokazując w ten sposób możliwe ścieżki wiodące do celu, przedstawiając prognozę powiązanych kosztów, czasu trwania i prawdopodobieństwo.

Ekstrapolacja trendów/megatrendów (ang. *Trend Extrapolation/Megatrends*)

Ilościowa metoda prognozowania polegająca na ekstrapolacji w przyszłość modelu zbudowanego dla historycznych danych.

Eseje (ang. *Essays*)

Często traktowane jako forma scenariuszy. Opis prawdopodobnych przyszłych stanów i zdarzeń w oparciu o twórcze połączenie danych, faktów i hipotez.

Gry (ang. *Gaming*)

Zespołowe tworzenie przyszłości, konstruowanie wirtualnej rzeczywistości o zadanej dynamice rozwoju, czasami z elementami *Role Playing*.

Kluczowe technologie (ang. *Key Technologies*)

Wskazanie technologii kluczowych (krytycznych), uwzględniając stopień ich ważności. Technika stosowaną do ich wyboru są szeregujące wielokryterialne metody analizy. Natomiast preferencje można określić zarówno metodą Delphi, jak i np. metodą krzyżowej analizy wpływów czy zwykłym głosowaniem¹⁸⁷.

¹⁸⁴ J. Kuciński (2010), *Podręcznik metodyki foresight dla ekspertów projektu Foresight regionalny dla szkół wyższych Warszawy i Mazowsza*, „Akademickie Mazowsze 2030”, Politechnika Warszawska, <http://akademickiemazowsze2030.pl/Data/File/28.pdf> [13.10.2018]; J. Arcade, M. Godet, F. Meunier, F. Roubelat (1999), *Structural analysis with the MICMAC method & Actor's strategy with MACTOR method, Futures Research Methodology*, American Council for the United Nations University: The Millennium Project.

¹⁸⁵ GUS, *Definicje pojęć z zakresu statystyki nauki i techniki. Bibliometria*, <https://stat.gov.pl/metainformacje/sloownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/15,pojecie.html> [14.10.2018].

¹⁸⁶ GUS, *Definicje pojęć z zakresu statystyki nauki i techniki. Burza mózgów*, <https://stat.gov.pl/metainformacje/sloownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/1420,pojecie.html> [14.10.2018].

¹⁸⁷ Strona internetowa: „Priorytetowe technologie dla zrównoważonego rozwoju województwa świętokrzyskiego” prowadzonego w ramach Sektorowego Programu Operacyjnego „Wzrost

Mapowanie interesariuszy (ang. *Stakeholder mapping*)

Graficzne przedstawienie interesariuszy istotnych dla danego działania oraz ich indywidualnych interesów¹⁸⁸.

Marszrutę rozwoju technologii (ang. *Technology roadmapping*)

Metoda planowania strategicznego poprzez graficzne przedstawienie działań, jakie należy podjąć w celu opracowania, realizacji, rozwoju technologii uznanych za kluczowe¹⁸⁹.

Metoda delficka (ang. *Delphi*)

Celem jest zgodny sąd osób kompetentnych na określony temat. Głównym narzędziem wykorzystywanym jest ankieta dotycząca badanego problemu. Metoda delficka obejmuje zdefiniowanie problemu i wybór grupy ekspertów, przygotowanie i rozesłanie ankiety, analizę odpowiedzi z ankiety. Proces ankietowania powtarzany jest aż do osiągnięcia konsensusu¹⁹⁰.

Modelowanie i symulacje (ang. *Modelling and simulation*)

Proces tworzenia i eksperymentowania z modelem matematycznym naśladowującym zachowanie rzeczywistego procesu lub systemu w czasie, zachodzące podczas zmiany jego parametrów przy wykorzystaniu komputera¹⁹¹.

Panele eksperckie (ang. *Expert panels*)

Polegają na zorganizowaniu spotkań grupy osób o dużej wiedzy specjalistycznej, których zadaniem jest analiza i synteza istotnej wiedzy z zakresu danego tematu¹⁹².

Panele obywatelskie (ang. *Citizens panels*)

Konsultacje w formie zaangażowanej, aktywnej dyskusji z reprezentatywną lub celową grupą mieszkańców terytorium, którego dotyczy projektowana polityka¹⁹³.

Prognozowanie wsteczne (ang. *Backcasting*)

Określenie pewnego pożądanego stanu przyszłości, a następnie prowadzenie badania, które określi, co należy zrobić, jakie decyzje podjąć i jakie stosować narzędzia, aby określony stan został osiągnięty¹⁹⁴.

konkurencyjności przedsiębiorstw”, nr WKP_1/1.4.5/2/2006/20/23/601/2006/U, <http://www.tu.kielce.pl/foresight/zalozenia.html> [15.10.2018].

¹⁸⁸ Internetowa Encyklopedia Governica, Mapa Interesariuszy, https://www.governica.com/Mapa_interesariuszy_%28MSP%29 [15.10.2018].

¹⁸⁹ A.E. Gudanowska, A. Kononiuk (red.) (2013), *Kierunki rozwoju nanotechnologii w województwie podlaskim. Mapowanie. Marszrutę. Trendy*, „Rozprawy Naukowe” nr 245, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok.

¹⁹⁰ Internetowa encyklopedia zarządzania, https://mfiles.pl/pl/index.php/Badanie_metody_C4%85_Delphi [15.10.2018].

¹⁹¹ *The European Commission's science and knowledge service*, Online Foresight Guide JRC – IPTS, http://forlearn.jrc.ec.europa.eu/guide/4_methodology/meth_modelling.htm [15.10.2018].

¹⁹² Pilotażowe badania typu foresight (2012), Biuletyn informacyjny MCIG, <http://innowacyjnaradomka.pl/wp-content/uploads/2012/09/Pilota%C5%BCowe-badania-typu-foresight.pdf> [14.10.2018].

¹⁹³ E. Benedykt (2013), *Foresight. Sztuka i techniki zarządzania przyszłością*, Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową, Gdańsk, http://www.ibngr.pl/content/download/1474/16065/file/Fore-sight-Sztuka_i_tehniki_zarzadzania_przyszloscia.pdf [13.10.2018].

¹⁹⁴ M. Hajdas, E. Szabela-Pasierbińska (2016), *Metody przewidywania trendów w makrootoczeniu*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 459: 232–244, <https://doi.org/10.2478/v10007-016-0000-0>

Przegląd literatury (ang. *Literature review*)

Rzetelna, nieoceniająca analiza dotychczasowego stanu wiedzy dotyczącej badanego obszaru zawarta w naukowych publikacjach książkowych, raportach, artykułach¹⁹⁵.

Scenariusze (ang. *Scenarios*)

Opis możliwej przyszłej sytuacji (konceptualnej przyszłości), w tym ścieżek rozwoju, które mogą do niej prowadzić. Proces konstrukcji scenariuszy obejmuje definiowanie obiektu, jego elementów i relacji między nimi, analizę otoczenia, ilościowy opis powiązań, sporządzenie prognoz uwzględniających ewentualne zakłócenia rozwoju i opracowanie scenariuszy możliwej przyszłości¹⁹⁶.

Skanowanie otoczenia (ang. *Environmental scanning*)

Monitorowanie otoczenia zewnętrznego w poszukiwaniu informacji o zdarzeniach i relacjach w celu zidentyfikowania istniejących i przyszłych szans oraz zagrożeń, aby wspierać zarządzanie i wyznaczać przyszłe kierunki działania¹⁹⁷.

Sondaże (ang. *Questionnaire/Survey*)

Badanie opinii, postaw i preferencji odpowiednio dobranych respondentów. W badaniach wykorzystuje się najczęściej technikę ankiety¹⁹⁸.

Warsztaty (ang. *Workshops*)

Grupowa, koncepcyjna praca ludzi polegająca na rozwijaniu nowych pomysłów, wypracowywaniu wspólnego rozwiązania lub wizji przyszłości. Opiera się ona na spotkaniach członków grupy, podczas których zbierane są opinie i sugestie na temat obszaru badawczego bądź sposobu realizacji badań¹⁹⁹.

Wywiady (ang. *Interviews*)

Ustrukturyzowane rozmowy z ekspertami lub interesariuszami mające na celu wydobyć „ukrytej wiedzy” (tej, która nie wyłania się z analizy literatury), poddanie ocenie wyników projektu i wynikających zeń hipotez²⁰⁰.

Inne metody (ang. *Other methods*)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: R. Popper, M. Keenan, I. Miles, M. Butter, G. Sainz (2007), *Global Foresight, Outlook 2007. Mapping Foresight in Europe and the rest of the World. Annual Mapping Report*, European Commission, EFNM Network; R. Popper (2009), *Mapping Foresight...*, op. cit.

org/110.15611/pn.2016.459.22.

¹⁹⁵ J. Nazarko, J. Ejdyś (red.) (2011), *Metodologia i procedury badawcze w projekcie foresight technologiczny <<NT FOR PODLASKIE 2020>>. Regionalna strategia rozwoju nanotechnologii*, „Rozprawy Naukowe” nr 218, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok.

¹⁹⁶ A. Kononiuk, A. Magruk (2008), *Przegląd metod i technik badawczych stosowanych w programach foresight*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 28–40; H. Kosow, R. Gaßner (2008), *Methods of Future and Scenario Analysis, Overview, Assessment, and Selection Criteria*, “Studies Deutsches Institut für Entwicklungspolitik” 39, Bonn.

¹⁹⁷ A. Nalepka (red.) (2009), *Organizacje komercyjne i niekomercyjne wobec wzmoczonej konkurencji oraz wzrastających wymagań konsumentów*, Wyższa Szkoła Biznesu, Nowy Sącz.

¹⁹⁸ J. Nazarko, J. Ejdyś (red.), *Metodologia i procedury...*, op. cit.

¹⁹⁹ Ibidem.

²⁰⁰ E. Benedykt, *Foresight. Sztuka i techniki...*, op. cit.

W obszernym zbiorze metod analizy technologii za metody priorytetyzujące można uznać wszystkie te, które dane o technologiach transformują w wartościującą klasyfikację technologii. W najprostszej formie są to metody, które każdej technologii – T_j , opisanej wektorem cech v_j , określają jej wartość $V(T_j)$ na podstawie wartości cech i ich wag – w_j ²⁰¹:

$$V(T_j) = F(\mathbf{v}_j, \mathbf{w}_j), \tag{1.1}$$

gdzie:

- T_j – technologia,
- $V(T_j)$ – wartość oceny technologii,
- F – funkcja oceny technologii,
- \mathbf{v}_j – wektor wartości ocen technologii T_j ; $\mathbf{v}_j = [v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{js}]$,
- \mathbf{w}_j – wektor wag kryteriów oceny technologii T_j ; $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{js}]$,
- S – liczba kryteriów ocen.

Typowym przykładem funkcji jest suma iloczynów wag i wartości ocen:

$$V(T_j) = \sum_{s=1}^S w_{js} \cdot v_{js}. \tag{1.2}$$

Danymi procesu priorytetyzacji jest wstępna lista alternatywnych technologii wraz z macierzą wartości kryteriów oceny technologii (tabela 1.4).

Tabela 1.4. Struktura danych priorytetyzacji

		Technologie					
		T_1	T_2	...	T_j	...	T_n
Kryteria	v_1						
	v_2						
	v_s				v_{js}		
	v_s						

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Y. Chen (2006), *Multiple Criteria Decision Analysis: Classification Problems and Solutions*, PhD thesis in Systems Design Engineering, University of Waterloo, <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/OWTU/TC-OWTU-948.pdf> [11.10.2018].

²⁰¹ Y. Chen (2006), *Multiple Criteria Decision Analysis: Classification Problems and Solutions*, PhD thesis in Systems Design Engineering, University of Waterloo, s. 17, <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/OWTU/TC-OWTU-948.pdf> [11.10.2018].

Obecne i przyszłe wyzwania gospodarcze, środowiskowe i społeczne oraz ich kombinacja implikują rozbudowane systemy oceny. Kryteria brane pod uwagę w analizie technologii wynikają zawsze z kontekstu oceny i są warunkowane przez przedmiot i dziedzinę analizy²⁰². Za F.T.S Chan i in.²⁰³ można wyróżnić kryteria subiektywne (np. elastyczność, jakość) i obiektywne (np. ekonomiczne). Propozycję zestawu 184 kryteriów oceny podzielonych na 12 grup tematycznych opracowali K. Klincewicz i A. Manikowski²⁰⁴. Wyróżnili: kryteria dotyczące innowacyjności, kryteria dotyczące konkurencyjności, kryteria strategiczne, kryteria dotyczące doświadczeń organizacji-dostawcy, kryteria dotyczące znaczenia technologii dla organizacji dostawcy, kryteria marketingowe, kryteria dotyczące zastosowań technologii, kryteria techniczne, kryteria dotyczące technologii produkcyjnych, kryteria dotyczące ochrony patentowej, kryteria społeczne i etyczne, kryteria ekologiczne. Zdaniem K. Klincewicza i A. Manikowskiego²⁰⁵ każda specyficzna ocena może polegać na wyborze kryteriów z listy, dostosowując ją do celów badania i specyficznych cech technologii. Należy podkreślić, że kryteria priorytetyzacji będą zupełnie odmienne podczas wskazywania kluczowych technologii dla danego kraju bądź regionu niż podczas oceny wytwarzania różnych wyrobów za pomocą konkretnych technologii²⁰⁶. Ocena technologii na potrzeby podejmowania decyzji strategicznych z zakresu polityki technologicznej jest w większym stopniu zorientowana na zagadnienia natury ogólnej i bardziej odnosi się do skutków wprowadzania technologii dla społeczeństwa. Jej wyniki mogą znaleźć zastosowanie w procesie planowania lub tworzenia norm i standardów dotyczących technologii, a także wytyczania przyszłych kierunków rozwoju²⁰⁷. W wypadku jednostek gospodarczych ocena technologii będzie w większym stopniu ukierunkowana na możliwości i skutki zastosowania konkretnych technologii, uwzględniając ich atrakcyjność dla przedsiębiorstwa i zapotrzebowanie rynku²⁰⁸. Według D. Loveridge'a²⁰⁹ podstawowe motywy stosowania oceny technologii na potrzeby organizacji gospodarczej obejmują: wspomaganie wyboru najbardziej efektywnej technologii, co przekłada się na minimalizację kosztów stałych i zmiennych oraz maksymalizację przyszłych zysków, ale także zapewnienie zgodności z przepisami prawnymi. Niezależnie

²⁰² E. Chodakowska, *Koncepcja analizy...*, op. cit.

²⁰³ F.T.S. Chan, M.H. Chan, N.K.H. Tang (2000), *Evaluation methodologies for technology selection*, "Journal of Materials Processing Technology" 107: 330–337, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00679-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00679-8).

²⁰⁴ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

²⁰⁵ Ibidem.

²⁰⁶ J. Łunarski, *Zarządzenie technologiami...*, op. cit.

²⁰⁷ B. Poteralska, *Metodyka wspomagania...*, op. cit., s. 82.

²⁰⁸ D. Loveridge, *Foresight, Technology Assessment...*, op. cit.

²⁰⁹ Ibidem.

od celu i przedmiotu priorytetyzacji podstawą wskazania zarówno ocenianych technologii, jak i kryteriów oceny jest wiedza ekspercka.

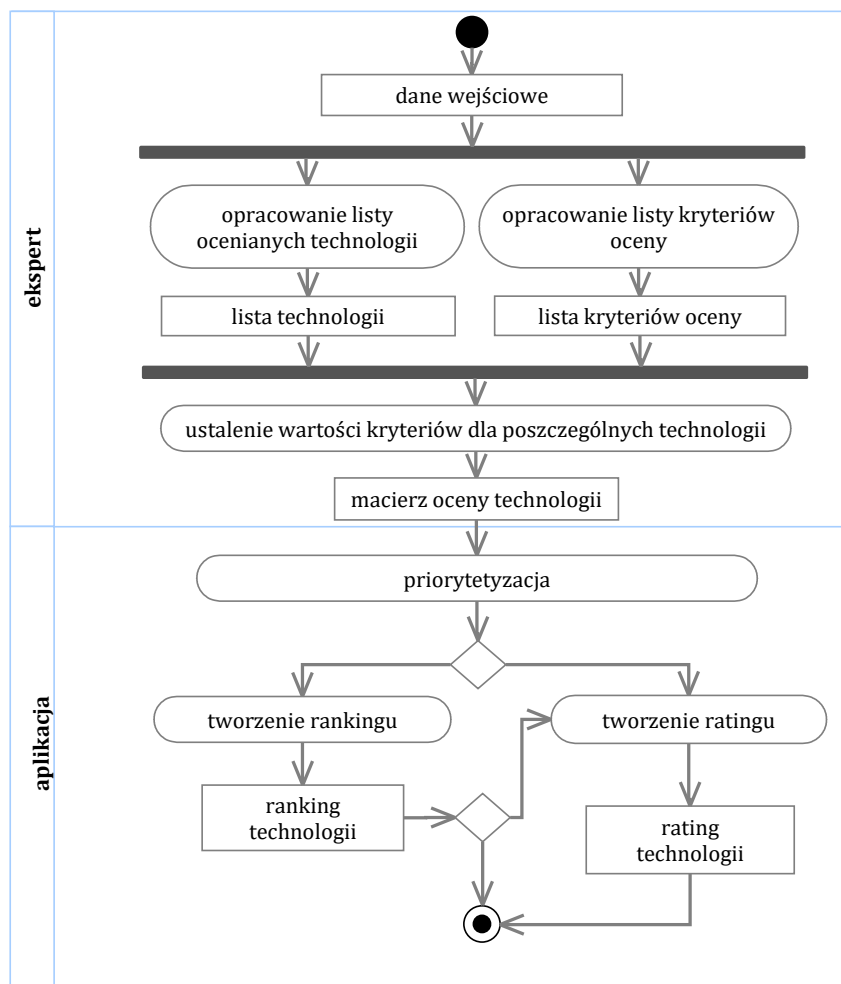
Gromadzenie i porządkowanie danych do priorytetyzacji może być wykonane za pomocą różnych technik: wykorzystując dane historyczne, bazy tekstowo-bibliograficzne i patentowe przy udziale ekspertów lub wyłącznie wykorzystując wiedzę ekspercką. Oznacza to, że eksperci mogą pracować na przygotowanej *a priori* bazie danych lub samodzielnie tworzyć ją i uzupełniać. Wyzwaniem etapu agregacji i syntezy danych jest osiągnięcie konsensusu co do obszarów oceny czy wag poszczególnych kryteriów, które będą równoważyły różne opinie, wartości, potrzeby. Rozważone powinny być też konsekwencje wykorzystania różnych skal pomiarowych wartości kryteriów, które mogą mieć charakter danych mierzalnych w wybranych jednostkach, porządkowych (np. wartościujących pojęć lingwistycznych), przedziałowych, zbiorów probabilistycznych czy rozmytych²¹⁰. Suplementarną kwestią jest dylemat uwzględnienia informacji o poziomie wiedzy specjalistycznej każdego z ekspertów biorących udział w konsultacjach. Ponadto eksperci mogą pracować w formalnych ramach konkretnych metod bądź współpraca może mieć postać elastycznych konsultacji.

Rezultat priorytetyzacji technologii może przyjąć formę ratingu, czyli oceny z predefiniowanej kategorii, bądź wyniku punktowego w odpowiednich skalach, na przykład liczb całkowitych lub rzeczywistych. Wyniki rankingu punktowego mogą zostać sklasyfikowane i także być podstawą ratingu²¹¹. Uzyskane oceny technologii powinny być bazą do opracowywania scenariuszy czy tworzenia marszrut rozwoju technologii. Nade wszystko należy je wykorzystać do podejmowania konkretnych działań strategicznych, pozwalających na osiągnięcie bądź zbliżenie się do stanu pożądanego w procesach kształtowania i realizacji polityki innowacyjnej.

Podsumowując, można stwierdzić, że kompleksowy proces priorytetyzacji technologii obejmuje: gromadzenie danych o technologiach i kryteriach oceny przy współpracy ekspertów oraz właściwą priorytetyzację, której efektem jest uporządkowana klasyfikacja technologii. Wyniki priorytetyzacji mogą zostać wykorzystane do tworzenia szczegółowych opracowań. Schemat procedury priorytetyzacji zilustrowano na diagramie na rysunku 1.4.

²¹⁰ Y. Chen, *Multiple Criteria Decision Analysis...*, op. cit.

²¹¹ E. Chodakowska, K. Wardzińska (2013), *The Attempt to Create an Internal Credit Risk Rating of Production Companies with the Use of Operational Research Method*, "Quantitative Methods In Economics" 14(1): 74–83, http://qme.sggw.pl/wp-content/uploads/MIBE_T14_z1.pdf [12.07.2018].



Rysunek 1.4. Procedura priorytetyzacji technologii

Źródło: opracowanie własne na podstawie UNIDO (2005), *Technology Foresight Manual*, vol. 1, *Organization and Methods*, UNIDO, Vienna, [https://open.unido.org/api/documents/4788327/download/UNIDO%20TECHNOLOGY%20FORESIGHT%20MANUAL.%20VOLUME%201%20-%20ORGANIZATION%20AND%20METHODS%20\(23148.en\)](https://open.unido.org/api/documents/4788327/download/UNIDO%20TECHNOLOGY%20FORESIGHT%20MANUAL.%20VOLUME%201%20-%20ORGANIZATION%20AND%20METHODS%20(23148.en)) [16.07.2018]; K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.; J. Nazarko (red.), Z. Kędzior (red.) (2010), *Uwarunkowania rozwoju nanotechnologii w województwie podlaskim. Wyniki analiz STEEPVL i SWOT*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, http://ntfp2020.pb.edu.pl/pliki/Uwarunkowania_rozwoju_nanotechnologii_w_wojew%C3%B3dztwie_podlaskim_Wyniki_analiz_STEEPVL_i_SWOT.pdf [16.07.2018]; F.T.S. Chan, M.H. Chan, N.K.H. Tang (2000), *Evaluation methodologies for technology selection*, "Journal of Materials Processing Technology" 107(1–3): 330–337, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00679-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00679-8); E. Chodakowska, *Koncepcja analizy...*, op. cit.

Na każdym etapie mogą być wykorzystane konkretne techniki. Przyporządkowanie, oparte na analizie możliwości zastosowania i adekwatności najpopularniejszych metod analizy technologii wymienionych w tabeli 1.3 do konkretnych etapów, przedstawiono w tabeli 1.5.

Tabela 1.5. Metody etapów priorytetyzacji technologii

Etap	Metody	
Techniki pracy ekspertów i interesariuszy	Panele obywatelskie Panele eksperckie Gry Warsztaty Burze mózgów Metoda delficka Wywiady Sondaże	
Gromadzenie danych o technologiach	Jakościowe	Ilościowe
	Przegląd literatury Skanowanie otoczenia Mapowanie interesariuszy Analiza SWOT Prognozowanie wsteczne Drzewa odniesień	Bibliometria Ekstrapolacja trendów/ megatrendów Modelowanie i symulacje Analiza morfologiczna Analiza wpływów krzyżowych
Metody priorytetyzacji	Analiza wielokryterialna Kluczowe technologie	
Opracowanie wyników priorytetyzacji	Eseje Marszrutę rozwoju technologii Scenariusze	

Źródło: opracowanie własne.

Technikami konsultacji przeprowadzanymi wśród ekspertów i nieekspertów są: panele obywatelskie, panele eksperckie, gry, warsztaty, burze mózgów, metoda delficka, wywiady, sondaże. Do etapu gromadzenia danych przyporządkowano zarówno metody eksploracji danych z baz danych: ilościową bibliometrię i jakościowy przegląd literatury, metody obserwacyjne, tj.: skanowanie otoczenia, mapowanie interesariuszy, jak i metody jakościowe – analizujące i porządkujące cechy technologii i jej otoczenia, jednak bezpośrednio nie wartościujące samej technologii: analizę SWOT, prognozowanie wsteczne czy drzewa odniesień. Istotne informacje o technologiach można uzyskać, stosując także ustrukturyzowane procedury analizy morfologicznej i wpływów krzyżowych. Do technik gromadzenia danych zaliczono też metody ilościowe modelujące i prognostyczne, które dostarczając informacji o możliwej przyszłości, nie

klasyfikują technologii: modelowanie i symulacje oraz ekstrapolację trendów/megatrendów. Wyniki wymienionych metod rozbudowują znacząco wiedzę o technologiach i często sugerują wstępną ocenę, jednak nie są to klasyczne metody priorytetyzujące. Uszeregowanie technologii, przyporządkowanie ich do predefiniowanych klas bądź wprost wybór najlepszej technologii bezpośrednio można uzyskać, stosując z wymienionych w tabeli 1.3 najpopularniejszych metod technikę analizy wielokryterialnej i metodę kluczowych technologii. Rezultaty oceny technologii mogą być podstawą tworzenia scenariuszy i esejów czy marszrut rozwoju.

Analiza wielokryterialna to liczna grupa metod wspomagania decyzji (ang. *Multiple Criteria Decision Making* – MCDM). S. Greco i in.²¹² wyróżnili dwa podstawowe modele stosowane w analizie wielowymiarowej: funkcjonalny, bazujący na wieloatrybutowej teorii użyteczności, za twórców której uważani są R.L. Keeney i H. Raiffa²¹³, oraz relacyjny, wykorzystujący relacje przewyższania B. Roya²¹⁴ i relacje rozmyte J. Fodora i M. Roubensa²¹⁵. W metodach bazujących na funkcji użyteczności każdy wariant decyzyjny oceniany jest ze względu na każde z kryteriów, a uzyskane oceny agreguje się za pomocą funkcji użyteczności. Tym samym podstawowym wyzwaniem jest opracowanie postaci funkcji użyteczności²¹⁶. Metody funkcjonalne obejmują m.in: metodę sumy ważonej²¹⁷ (ang. *Simple Additive Weighting Method* – SAW) oraz jej wersję rozmytą (ang. *Fuzzy Simple Additive Weighting Method* – FSAW), metody SMART²¹⁸ (ang. *Simple Multi-Attribute Ranking Technique*) i SMARTER²¹⁹ (ang. *Simple Mul-*

²¹² S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński (2001), *Rough sets theory for multicriteria decision analysis*, "European Journal of Operational Research" 129(1): 1–47, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00167-3).

²¹³ R.L. Keeney, H. Raiffa (1976), *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*, John Wiley & Sons, New York.

²¹⁴ B. Roy (1990), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

²¹⁵ J. Fodor, M. Roubens (1994), *Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support*, Kluwer, Dordrecht.

²¹⁶ T. Trzaskalik (2016), *Modelowanie preferencji w wielokryterialnych dyskretnych problemach decyzyjnych – przegląd bibliografii*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 426: 214–225, <https://doi.org/10.15611/pn.2016.426.22>.

²¹⁷ C.W. Churchman, R.L. Ackoff (1954), *An approximate measure of value*, "Journal of Operations Research Society of America" 2(2): 172–187, <https://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.

²¹⁸ W. Edwards (1971), *Social utilities*, The Engineering Economist Summer Symposium, Series 6: 119–129; W. Edwards (1977), *How to use multi-attribute utility measurement for social decision-making*, "IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics" 7(5): 326–340, <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>.

²¹⁹ W. Edwards, F.H. Barron (1994), *SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multi-attribute Measurement*, "Organizational Behavior and Human Decision Process" 60(3): 306–325, <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>.

ti-Attribute Ranking Technique Exploiting Ranks), a także metody typu UTA²²⁰ (ang. *Utilities Additives*) i TOPSIS²²¹ (ang. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Ponadto do grupy tej zaliczane są: metoda hierarchii analitycznej/metoda analitycznego procesu hierarchicznego²²² (ang. *Analytic Hierarchy Process* – AHP) i jej wersja rozmyta²²³ (FAHP) oraz rozwinięcie metody AHP w postaci analitycznego procesu sieciowego²²⁴ (ang. *Analytic Network Process* – ANP). Z kolei popularnymi metodami modelu relacyjnego są rodziny metod ELECTRE²²⁵ (fr. *ELimination Et Choix Traduisant la Realia*) i PROMETHEE²²⁶ (ang. *Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*). Bardziej szczegółowa klasyfikacja wielokryterialnych metod wspomagania decyzji zaproponowana przez T. Trzaskalika²²⁷ wydziela: metody addytywne (SAW, FSAW, SMART i SMARTER), metodę hierarchii analitycznej i metody pokrewne (AHP, FAHP, ANP), metody werbalne (np. metoda ZAPROS²²⁸ – ros. *Метод ЗАПРОС – Замкнутые Процедуры у Опорных Ситуаций*), metody ELECTRE, wykorzystanie punktów referencyjnych (TOPSIS), metody PROMETHEE oraz interaktywne metody rozwiązywania dyskretnych problemów podejmowania decyzji. E. Zavadskas i Z. Turskis²²⁹, rozważając współczesne wykorzystanie metod MCDM, przy-

²²⁰ E. Jacquet-Lagrange, J. Siskos (1982), *Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making: The UTA method*, "European Journal of Operational Research" 10(2): 151–164, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2).

²²¹ C.-L. Hwang, K. Yoon (1981), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Springer-Verlag, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.

²²² T.L. Saaty (1980), *The analytic hierarchy process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York; T.L. Saaty (1987), *The analytic hierarchy process—what it is and how it is used*, "Mathematical Modelling" 9(3–5): 161–176, [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

²²³ P.J.M. van Laarhoven, W. Pedrycz (1983), *A fuzzy extension of Saaty's priority theory*, "Fuzzy Sets and Systems" 11(1–3): 229–241, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7).

²²⁴ T.L. Saaty (1996), *Decision making with dependence and feedback. The analytic network process: The Organization and Prioritization of Complexity*, RWS Publications, Pittsburgh.

²²⁵ B. Roy (1968), *Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)*, "La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)" 8: 57–75.

²²⁶ J.P. Brans (1982), *L'ingénierie de la décision: élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*, Presses de l'Université Laval.

²²⁷ T. Trzaskalik (2014), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria: „Organizacja i Zarządzanie” 74(1921): 239–263; T. Trzaskalik (red.) (2014), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Metody i zastosowania*, PWE.

²²⁸ O.I. Larichev, H.M. Moskovich (1995), *ZAPROS-LM – a method and system for ordering multi-attribute alternatives*, "European Journal of Operational Research" 82(3): 503–521, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0143-L](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0143-L).

²²⁹ E. Zavadskas, Z. Turskis (2011), *Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Methods in Economics: An Overview*, "Technological and Economic Development of Economy" 17(2): 397–427, <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>.

wołali systematyki opracowane przez: A. Guitonio i J.M. Martela²³⁰, C.L. Hwanga i K. Yoona²³¹, O. I. Laricheva²³², J. Figueirę i in.²³³, V. Beltona i T.J. Stewarta²³⁴.

Podobnie stosowana w praktyce projektów foresightu technologicznego metoda kluczowych technologii nie jest konkretną jedną procedurą obliczeniową. Implementacja metody kluczowych technologii, czyli wskazanie najważniejszych, w przypadku wieloaspektowej oceny może polegać na wykorzystaniu wybranej techniki analizy wielokryterialnej. Stosowanym nieskomplikowanym podejściem jest ocena w dwóch wymiarach, przy czym konwencjonalnymi funkcjami wymiarów są: atrakcyjność, rozumiana jako korzyści społeczno-gospodarcze, szanse naukowo-techniczne generowane przez technologie oraz wykonalność, czyli możliwość realizacji technologii, jej potencjał badawczo-technologiczny i potencjał do absorpcji korzyści społeczno-gospodarczych²³⁵ (J. Nazarko i A. Magruk²³⁶). Innymi analizowanymi wymiarami bywają na przykład: atrakcyjność i wpływ na pozycję konkurencyjną (T. Durand²³⁷), znaczenie i wykonalność (K. Klusacek²³⁸) czy wpływ i wykonalność²³⁹. Dokonywanie wyboru na podstawie oceny dwukryterialnej ilustrują wykresy na rysunku 1.5.

²³⁰ A. Guitoni, J.M. Martel (1998), *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*, "European Journal of Operational Research" 109(2): 501–521, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3).

²³¹ C.-L. Hwang, K. Yoon, *Multiple Attribute...*, op. cit.

²³² O.I. Larichev (2000), *Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах (Theory and Methods of Decision Making, Complete with the Fairylands Chronicle)*, Moscow: Logos, 2000.

²³³ J. Figueira, S. Greco, M. Ehrgott (red.) (2005), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, <https://doi.org/10.1007/b100605>.

²³⁴ V. Belton, T.J. Stewart (2002), *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*, Boston: Kluwer Academic Publications, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>.

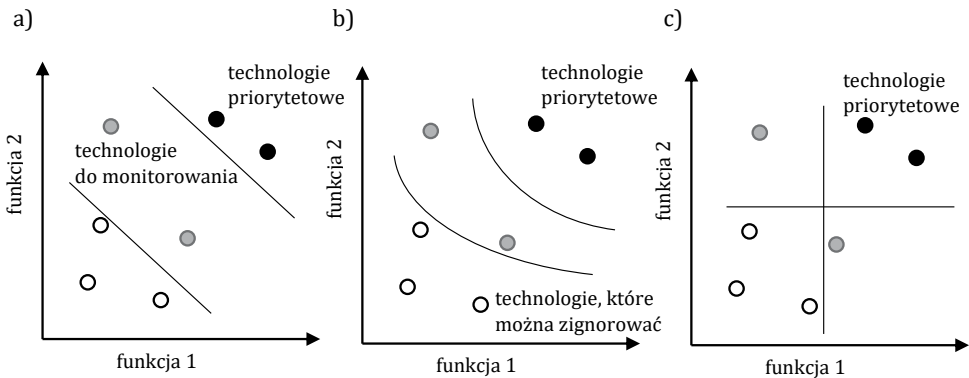
²³⁵ A.E. Gudanowska (2014), *Atrakcyjność i wykonalność nanotechnologii priorytetowych dla rozwoju województwa podlaskiego w świetle wyników badania foresightowego*, „Mechanik” 87(3), s. 222–227, http://www.nazarko.pl/public/data/resource/upload/00003/2531/file/atrakcyjnosci_wykonalnosc_nanotechnologii_priorytetowych_dla_rozwoju_województwa_podlaskiego_w_swietle_wynikow_badiania foresightowego.pdf [12.01.2019].

²³⁶ J. Nazarko, A. Magruk (red.) (2013), *Kluczowe nanotechnologie w gospodarce Podlasia*, „Rozprawy Naukowe” nr 243, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, http://ntfp2020.pb.edu.pl/pliki/Kluczowe_nanotechnologie_w_gospodarce_Podlasia.pdf [13.07.2018].

²³⁷ T. Durand (2003), *Twelve lessons from 'Key Technologies 2005': the French Technology Foresight Exercise*, "Journal of Forecasting" 22(2–3): 161–177, <https://doi.org/10.1002/for.856>.

²³⁸ K. Klusacek (2003), *Selection of research priorities – method of critical technologies*, Technology Centre of the CAS, https://www.tc.cz/files/istec_publications/unido-course-critical-technologies-1029-1.pdf [13.07.2013].

²³⁹ *Australia 2030: navigating our uncertain future* (2016), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), https://www.csiro.au/~media/Do-Business/Files/Futures/FUTURES_Australia2030_Report_web.pdf?la=en&hash=9612D5EC9C7998DC660269E1BDCE4F52B512C9E7 [13.07.2018].



Rysunek 1.5. Wykresy decyzyjne priorytetyzacji dwuwymiarowej: a) K. Klusacek, b) Australia 2030, c) J. Nazarko i A. Magruk

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit.; *Australia 2030...*, op. cit.; K. Klusacek, *Selection...*, op. cit.

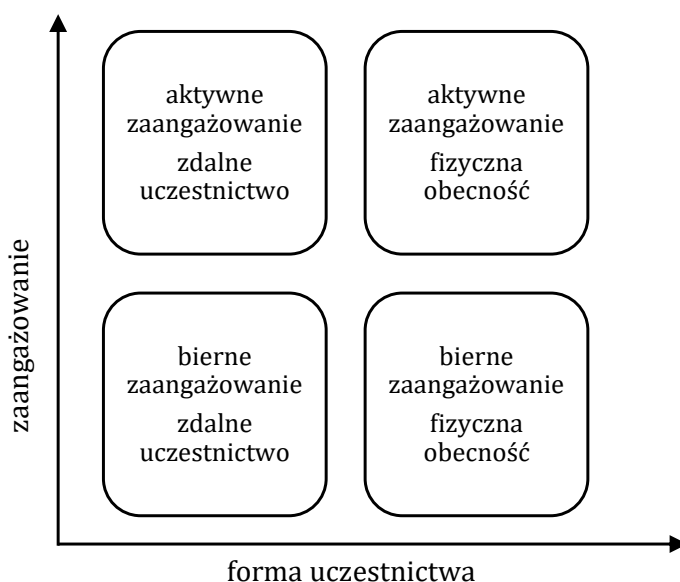
Metoda DEA, proponowana w hybrydowym modelu priorytetyzacji technologii, jest niekiedy wskazywana jako narzędzie MCDM²⁴⁰, a w literaturze znaleźć można prace analizujące relację między DEA i MCDM²⁴¹. DEA wpisuje się w grupę metod analiz wielokryterialnych, wykorzystując specyficzną funkcję użyteczności z sumą ważoną ocen definiowaną przez empiryczne punkty referencyjne. Ocena technologii w metodzie DEA jest analizą jej wartości wyrażoną przez relację sumy funkcjonalności technologii do sumy kosztów w odniesieniu do oceny alternatywnych technologii.

Poza wyborem techniki gromadzenia i analizy danych kluczowym elementem procesu priorytetyzacji są eksperci, których wiedza oraz doświadczenie stanowią podstawę przygotowania zarówno listy alternatywnych technologii, jak i kryteriów oceny, a często również wartości kryteriów poszczególnych technologii (w przypadku, gdy wartości kryteriów są nieznane i nie mogą być określone na podstawie testów lub eksperymentów). Odpowiedni wybór ekspertów daje możliwość zapewnienia szerokiego spojrzenia i uwzględnienia perspektyw wielu interesariuszy podczas określania listy technologii i kryte-

²⁴⁰ J. Doyle, R. Green (1993), *Data Envelopment Analysis and Multiple Criteria Decision Making*, "Omega" 21(6): 713–715, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(93\)90013-B](https://doi.org/10.1016/0305-0483(93)90013-B); T.J. Stewart (1994), *Data Envelopment Analysis and Multiple Criteria Decision Making: a Response*, "Omega" 22(2): 205–206, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(94\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0305-0483(94)90079-5); A. Papagapiou, J. Mingers, E. Thanassoulis (1997), *Would you buy a used car with DEA?*, "OR Insight" 10(1): 13–19,

²⁴¹ V. Belton, S.P. Vickers (1993), *Demystifying DEA – a Visual Interactive Approach based on Multiple Criteria Analysis*, "Journal of the Operational Research Society" 44(9): 883–896, <https://doi.org/10.1057/jors.1993.157>; T.J. Stewart (1996), *Relationships between DEA and MCDM*, "Journal of the Operational Research Society" 47(5): 654–665, <https://doi.org/10.1057/jors.1996.77>.

riów priorytetyzacji. K. Santarek²⁴² wskazuje na stosunkową wysoką jakość danych uzyskanych na podstawie opinii eksperckich, lecz jednocześnie podkreśla, że na opinie ekspertów może mieć wpływ sam proces pozyskiwania opinii czy sposób formułowania pytań. Eksperci, ich liczba, a także forma konsultacji bezpośrednio przekładają się na koszty projektu. Według J.P. Gavigana i in.²⁴³ decyzja o sposobie wykorzystania wiedzy eksperckiej może być podjęta spośród czterech podstawowych możliwości (zilustrowanych na rysunku 1.6) wyróżnionych na podstawie zaangażowania – aktywnego włączenia się lub indyferencji oraz formy uczestnictwa, osobistej bądź zdalnej – powiązanych z konkretnymi metodami oceny technologii.



Rysunek 1.6. Techniki pracy ekspertów

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J.P. Gavigan, F. Scapolo, M. Keenan, I. Miles, F. Farhi, D. Lecoq, M. Capriati, T.D. Bartolomeo (red.), *A Practical Guide...*, op. cit.

W każdym wypadku wykorzystanie sądów eksperckich jest równoznaczne z przyjęciem do analizy informacji subiektywnej i niepewnej. Niepewność, którą można zdefiniować jako stan polegający na braku pewności co do prawdziwo-

²⁴² K. Santarek, *Prognozowanie rozwoju...*, op. cit. s. 17.

²⁴³ J.P. Gavigan, F. Scapolo, M. Keenan, I. Miles, F. Farhi, D. Lecoq, M. Capriati, T.D. Bartolomeo (red.) (2001), *A Practical Guide to Regional Foresight, FOREN*, Foresight for Regional Development Network, European Communities, <http://foresight.jrc.ec.europa.eu/documents/eur20128en.pdf> [12.07.2018].

ści danego zdania lub skutków jakiegoś działania²⁴⁴, braku możliwości przewidywania zdarzenia²⁴⁵, potwierdzenia prawdziwości stwierdzenia o przyszłości²⁴⁶ ze względu na brak wiedzy, jest w zasadzie nieodłącznym elementem procesu analizy technologii. Podstawowymi źródłami niepewności w wypadku oceny technologii będą niedokładne bądź niepełne lub niewiarygodne dane charakteryzujące technologię, niemożliwość przewidzenia i oszacowania wszystkich konsekwencji oddziaływania środowiska i społeczeństwa na technologię oraz technologii na środowisko i społeczeństwo. Dodatkowo, na co zwraca uwagę P. Wiench²⁴⁷, dyskusyjna może być również bezstronność ekspertów, którzy są grupą interesu korzystającą z technologii, a także podlegającą naciskom i lobbowaniu. Największa niepewność wiąże się szczególnie z oceną i decyzjami dotyczącymi technologii wyłaniających się, w początkowych fazach cyklu ich życia. Jednak biorąc pod uwagę stopień skomplikowania współczesnych systemów technologicznych, do technologii na każdym etapie rozwoju i dojrzałości ma zastosowanie sformułowana przez L. Zadeha²⁴⁸ zasada niekompatybilności: wraz ze wzrostem złożoności systemu zdolność do formułowania precyzyjnych, a jednocześnie istotnych stwierdzeń na temat jego zachowania zmniejsza się, osiągając próg, poza którym precyzja i istotność (lub trafność) stają się cechami niemal wykluczającymi się przy stosowaniu technik ilościowych²⁴⁹.

Ogólny problem wykorzystywania wiedzy niepewnej zarówno w badaniach naukowych, jak i w rozwiązaniach aplikacyjnych jest kwestią bardzo często podnoszoną i wielokrotnie dyskutowaną. W literaturze można odnaleźć wiele metod opracowanych w celu radzenia sobie z niepewnością wiedzy. Znaczna część z nich postuluje nadanie wiedzy ilościowego stopnia niepewności, co może pozwolić na sformalizowanie rozumowania oraz na skuteczne zarządzanie niepewnością. Jednym z najpopularniejszych podejść do modelowania

²⁴⁴ Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/index.php/Niepewno-%C5%9B%C4%87> [17.07.2018].

²⁴⁵ M. Bochenek (2012), *Ryzyko i niepewność w naukach ekonomicznych – rozważania semantyczne*, „Ekonomia” 4(21): 46–63, http://www.dbc.wroc.pl/Content/22688/Bochenek_Ryzyko_i_niepewnosc_w_naukach.pdf [17.07.2018].

²⁴⁶ A. Stabryła (2010), *Koncepcje zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem*, Mfiles.pl, seria wydawnicza Encyklopedia Zarządzania, s. 142.

²⁴⁷ P. Wiench (2008), *Foresight w kontekście kultury technicznej*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 110–117, <https://pressto.amu.edu.pl/index.php/nsw/article/viewFile/4836/4938> [17.07.2018].

²⁴⁸ L.A. Zadeh (1973), *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*, “IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics” 3(1): 28–44, <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>.

²⁴⁹ Tłumaczenie własne: “as the complexity of a system increases, our ability to make precise and yet significant statements about its behavior diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) become almost rapid expansion in the use of quantitative techniques mutually exclusive characteristics”.

niepewności jest teoria zbiorów rozmytych (ang. *Fuzzy Sets*), którą zaproponował L.A. Zadeh²⁵⁰. Teoria ta jest pewnym rozszerzeniem logiki wartościowej zaproponowanej przez J. Łukasiewicza²⁵¹, w której przyjmuje się więcej niż dwie wartości logiczne. Dynamiczny rozwój teorii zbiorów rozmytych można zaobserwować od momentu pierwszej publikacji L.A. Zadeha w 1965 roku, nie tylko w obszarze aplikacyjnym (liczba zastosowań zaczęła rosnać szczególnie szybko od lat dziewięćdziesiątych XX wieku²⁵²), ale też metodycznym. K.T. Atanassov²⁵³, a także E.E. Kerre²⁵⁴, H.-J. Zimmermann²⁵⁵ jako najwcześniejsze uogólnienie zbiorów rozmytych wymieniają zbiory L-rozmyte (ang. *L-fuzzy sets*) J.A. Goguena²⁵⁶, który wprowadził pojęcie zbioru jako funkcji przynależności będącej elementem karty zupełnej. W 1975 roku L.A. Zadeh²⁵⁷ zaproponował zbiory rozmyte 2 typu (ang. *Type 2 Fuzzy Set – T2FS*). Innym popularnym²⁵⁸ uogólnieniem są przedziałowe zbiory rozmyte (ang. *Interval-Valued Fuzzy Sets*), eksplorowane też pod nazwą przedziałowe zbiory rozmyte typu 2 (ang. *Interval Type-2 Fuzzy Sets – IT2FS*)²⁵⁹, które opracował R. Sambuc²⁶⁰ pod nazwą *fonctions φ -floues* (fr.). W 1983 roku K.T. Atanassov²⁶¹ zaproponował dwoistorozmyte zbiory, które określił mianem intuicjonistycznych zbiorów rozmytych (ang. *Intuitionistic Fuzzy Sets – IFS*).

²⁵⁰ L.A. Zadeh (1965), *Fuzzy sets, A Aristotle's Syllogistic from the Standpoint of Modern Formal Logic*, "Information and Control" 8(30): 338–353, [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

²⁵¹ J. Łukasiewicz, *Pamiętnik*, J. Jadacki (red.) i P. Surma (red.), Wydawnictwo Naukowe Semper, Warszawa 2013, <http://www.jadacki.eu/wp-content/uploads/2018/05/%C5%81ukasiewicz-Pami%C4%99tnik.pdf> [24.07.2018].

²⁵² A. Piegat (1999), *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, s. 10.

²⁵³ K.T. Atanassov (2017), *Type-1 Fuzzy Sets and Intuitionistic Fuzzy Sets*, "Algorithms" 10(3), 106: 1–12, <https://doi.org/10.3390/a10030106>.

²⁵⁴ E.E. Kerre (2011), *The Impact of Fuzzy Set Theory on Contemporary Mathematics (Survey)*, "Applied and Computational Mathematics" 10(1), Special Issue: 20–34, <http://hdl.handle.net/1854/LU-2132584>.

²⁵⁵ H.-J. Zimmermann (2001), *Fuzzy Set Theory – and Its Applications*. Fourth Edition, Springer Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>.

²⁵⁶ J.A. Gougen (1967), *L-fuzzy sets*, "Journal of Mathematical Analysis and Applications" 18(1): 145–174.

²⁵⁷ L.A. Zadeh (1975), *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I*, "Information Sciences" 8(3), 199–249, [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).

²⁵⁸ E.E. Kerre, *The Impact of Fuzzy Set...*, op. cit.; K.T. Atanassov, *Type-1 Fuzzy Sets...*, op. cit.

²⁵⁹ A. Niewiadomski (2013), *Cylindric extensions of interval-valued fuzzy sets in data linguistic summaries*, "Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing" 4(3):369–376, <https://doi.org/10.1007/s12652-011-0098-3>.

²⁶⁰ R. Sambuc (1975), *Fonctions φ -floues. Application à l'aide au diagnostic en pathologie thyroïdienne*. PhD thesis, Univ. Marseille, France.

²⁶¹ K.T. Atanassov (1983), *Intuitionistic fuzzy sets*, w: Proceedings of the VII ITKR's Session, Sofia, Bulgaria, 7–9 June 1983 (reprinted in "International Journal Bioautomation" 2016, 20: 1–6), http://www.biomed.bas.bg/bioautomation/2016/vol_20.s1/files/20.s1_02.pdf [24.07.2018].

Oprócz podejść, których bezpośrednią inspiracją była koncepcja zbiorów rozmytych i będących ich uogólnieniem, modyfikacją czy suplementacją, powstawały też modele, których podstawą były inne przesłanki i założenia. Poza wspomnianymi wcześniej wyodrębnić można w kolejności chronologicznej następujące podejścia do modelowania niepewności:

- *Flou set theory* (fr. *ensembles flous*²⁶²) – Y. Gentilhomme (1968)²⁶³;
- *L-flou set theory* – C.V. Negoita i D.A. Ralescu (1974, 1975)²⁶⁴;
- *Probabilistic set theory* (teoria zbiorów probabilistycznych) – K. Hirota (1981)²⁶⁵;
- *Rough set theory* (teoria zbiorów przybliżonych) – Z. Pawlak (1982)²⁶⁶;
- *Twofold fuzzy set theory* (teoria zbiorów dwuskładowych) – D. Dubois i H. Prade (1987)²⁶⁷;
- *Grey set theory* (teoria zbiorów szarych) – Deng Ju-Long (1982)²⁶⁸;
- *Fuzzy rough set theory* (teoria rozmytych przybliżonych zbiorów) – D. Dubois i H. Prade (1990)²⁶⁹;
- *Rough fuzzy set theory* (teoria przybliżonych rozmytych zbiorów) – D. Dubois i H. Prade (1990)²⁷⁰;
- *Theory of imprecise probabilities* (teoria nieprecyzyjnego prawdopodobieństwa) – P. Walley (1991)²⁷¹;
- *Toll set theory* – D. Dubois i H. Prade (1993)²⁷²;

²⁶² D. Dubois, H. Prade (2015), *The First Steps in Fuzzy Set Theory in France Forty Years Ago*. LFA: 24ème Conférence Francophone sur la Logique Floue et ses Applications: 29–41, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01316812/document> [2.11.2018].

²⁶³ Y. Gentilhomme (1968), *Les sous-ensembles flous en linguistique*, "Cahiers de Linguistique Théorique et Appliquée" 5: 47–63.

²⁶⁴ C.V. Negoita, D.A. Ralescu (1974), *Multimi vagi si aplicatiile lor. (Ensembles flous et leurs applications)*, Editura Tehnica, Bucuresti; C.V. Negoita, D.A. Ralescu (1975), *Fuzzy Sets, L-Sets, Flou Sets, w: Application of Fuzzy Sets to System Analysis, Interdisciplinary Systems Research*, Birkhäuser, Basel, s. 12–42, https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5921-9_2.

²⁶⁵ K. Hirota (1981), *Concepts of probabilistic sets*, "Fuzzy Sets and Systems" 5(1): 31–46, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90032-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90032-4).

²⁶⁶ Z. Pawlak (1982), *Rough sets*, "International Journal of Information and Computer Science" 11: 344–356, <https://doi.org/10.1007/BF01001956>.

²⁶⁷ D. Dubois, H. Prade (1987), *Twofold fuzzy sets and rough sets—Some issues in knowledge representation*, "Fuzzy Sets and Systems" 23(1): 3–18, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90096-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90096-0).

²⁶⁸ Deng Ju-Long (1982), *Control Problems of Grey Systems*, "Systems and Control Letters" 1(5): 288–294, [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X).

²⁶⁹ D. Dubois, H. Prade (1990), *Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets*, "International Journal of General Systems" 17(2–3): 191–209, <https://doi.org/10.1080/03081079008935107>.

²⁷⁰ Ibidem.

²⁷¹ P. Walley (1991), *Statistical reasoning with imprecise probabilities*, Chapman and Hall/CRC, [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(00\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(00)00031-1).

²⁷² D. Dubois, H. Prade (1993), *Toll Sets and Toll Logic*, w: R. Lowen, M. Roubens (red.), *Fuzzy Logic*, "Theory and Decision Library" (Series D: System Theory, Knowledge Engineering and Problem Solving) 12, Springer, Dordrecht: 169–177, https://doi.org/10.1007/978-94-011-2014-2_17.

- *Vague set theory* – W.L. Gau i D.J. Buehrer (1993)²⁷³;
- *Bipolar fuzzy set theory* – W.-R. Zhang (1994)²⁷⁴;
- *Soft set theory* – D.A. Molodtsov (1999)²⁷⁵.

W zadaniach analizy technologii podejścia do modelowania niepewności nie są stosowane jako autonomiczne metody analizy danych. Integrowane są z klasycznymi metodami oceny technologii, pozwalając wyrażać niepewność i niejednoznaczność danych, przede wszystkim terminów lingwistycznych. K. Klincewicz i A. Manikowski²⁷⁶ za najważniejsze hybrydowe matematyczne metody oceny, rankingowania i selekcji technologii przyjęli: rozmytą AHP (ang. *fuzzy AHP*), rozmytą metodę delficką (ang. *fuzzy Delphi*), euklidesową metodę rozmytą (ang. *Fuzzy Euclid*). W zastosowaniach aplikacyjnych w różnych kontekstach chętnie wykorzystywane są też modele rozmyte DEA (ang. *fuzzy DEA*).

W monografii proponuje się wykorzystanie koncepcji zbiorów przybliżonych i metody DEA w koherentnym modelu priorytetyzacji technologii w warunkach niepewności. Zbiory przybliżone Z. Pawlaka, będące rozwinięciem klasycznej teorii zbiorów, przez niektórych autorów są traktowane jako podejście na gruncie zbiorów rozmytych²⁷⁷, mimo pewnych różnic w założeniach. Wynika to przede wszystkim z faktu, że zostały opracowane w tym samym celu określenia niepewności, wykorzystują koncepcję dolnej i górnej granicy, a także pojęcie granulacji informacji, pojawiające się również w aspekcie zbiorów rozmytych (wyjaśnione w rozdziale 2.1). W ocenie technologii założenia teorii zbiorów przybliżonych można je wykorzystać na dwóch niezbędnych etapach analizy: do redukcji złożonych macierzy kryteriów oraz do modelowania niespójności ocen eksperckich będących pochodną niepewności wiedzy. W literaturze stosowane są też do określenia istotności (wag) kryteriów. W hybrydowym modelu priorytetyzacji technologii do tego celu postuluje się wykorzystanie metody DEA, która obiektywizuje nadawanie wag i nie wymaga przyjmowania *a priori* założeń.

Priorytetyzacja technologii jest wyrazem potrzeby świadomych, celowych działań w obszarze ukierunkowywania pożądanego rozwoju technologicznego. Złożoność problemu oraz niepewność, które stanowią nieodłączne elementy procesu oceny technologii, będące pochodną subiektywizmu w odniesieniu do

²⁷³ W.L. Gau, D.J. Buehrer (1993), *Vague sets*, "IEEE Transactions Systems, Man, Cybernetics" 23(2): 610–614, <https://doi.org/10.1109/21.229476>.

²⁷⁴ W.-R. Zhang (1994), *Bipolar fuzzy sets and relations: a computational framework for cognitive modeling and multi-agent decision analysis*, w: Proceedings of the 1st Int. Joint Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS/IFIS/NASA0): 305–309, <https://doi.org/10.1109/IJCF.1994.375115>.

²⁷⁵ D.A. Molodtsov (1999), *Soft set theory – First results*, "Computers & Mathematics With Applications" 37(4): 19–31, [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00056-5).

²⁷⁶ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

²⁷⁷ K.T. Atanassov, *Type-1 Fuzzy Sets...*, op. cit.; H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory...*, op. cit.

wykorzystywanych opinii, zarówno co do kryteriów priorytetyzacji, jak i wartości poszczególnych technologii, sprawiają, że dotychczas stosowane metody nie zawsze pozwalają na osiągnięcie oczekiwanych wyników i w konsekwencji na podejmowanie odpowiednich decyzji. Dotychczas w zadaniach oceny technologii i w pracach pokrewnych z powodzeniem stosowane były tylko wybrane możliwości zarówno zbiorów przybliżonych, jak i DEA. Przeprowadzone studia literaturowe wskazują na duży potencjał koncepcyjny i aplikacyjny analiz wykorzystujących metody zbiorów przybliżonych i metodę DEA. Autorka dostrzega możliwość zastosowania koncepcji zbiorów przybliżonych i DEA w celu opracowania oryginalnego, kompleksowego hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii, który ujmowałby wieloaspektową, obiektywną ocenę oraz pozwalał określać stopień niepewności wykorzystywanych ocen.

2. Teoretyczne podstawy hybrydowego modelu

W celu przedstawienia hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii jako „białej skrzynki” (ang. *white box*), umożliwienia poznania oraz zrozumienia jego struktury i działania, objaśniono metody oraz pojęcia wykorzystywane w opisie hybrydowego modelu. Treści przedstawione w rozdziale umożliwiają uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jakie atrybuty zbiorów przybliżonych i DEA uprawomocniają celowość ich wykorzystania w priorytetyzacji technologii? Rozdział rozpoczyna się od przedstawienia propedeutyki zbiorów przybliżonych. Ponadto odniesiono się również do zbiorów rozmytych w celu wskazania różnic między koncepcjami i uzasadnienia adekwatności zastosowania zbiorów przybliżonych w hybrydowym modelu. Następnie opisano metodę DEA, na której idei i wzorach oparto autorski hybrydowy model priorytetyzacji, porządkując rozproszone w literaturze informacje.

2.1. Wprowadzenie do zbiorów przybliżonych

Teoria zbiorów przybliżonych (ang. *Rough Sets*), opracowana przez Z. Pawłaka²⁷⁸, pozwala na formalny zapis wiedzy niepełnej (niedokładnej). Jest narzędziem sztucznej inteligencji, zwłaszcza w zakresie uczenia maszynowego i rozpoznawania wzorców, systemów analizy i wspomagania decyzji, rozumowania indukcyjnego²⁷⁹. Z powodzeniem wykorzystywana jest w systemach ekspertowych i zadaniach eksploracji wiedzy z baz danych do tworzenia reguł decyzyjnych i klasyfikacji²⁸⁰.

²⁷⁸ Z. Pawlak, *Rough sets...*, op. cit.

²⁷⁹ Z. Pawlak, J. Grzymala-Busse, R. Słowiński, W. Ziarko (1995), *Rough Sets*, “Communications of the ACM” 38(11): 89–95, <https://doi.org/10.1145/219717.219791>; S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński, *Rough sets theory...*, op. cit.; S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński (2000), *Extension of the rough set approach to multicriteria decision support*, “Information Systems and Operational Research (INFOR)” 38(3): 161–196, <https://doi.org/10.1080/03155986.2000.11732407>; Z. Pawlak (1993), *Rough sets: present state and the future*, “Foundations of Computing and Decision Sciences” 18(3–4): 157–166.

²⁸⁰ M. Kryszkiewicz (1998), *Rough set approach to incomplete information systems*, “Information Sciences” 112(1–4): 39–49, [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(98\)10019-1](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(98)10019-1); C. Zopounidis, M. Doumpos (2002), *Multicriteria classification and sorting methods: A literature review*, “European Journal of Operational Research” 138(2): 229–246, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00243-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00243-0); A.I. Dimitras, R. Słowiński, R. Susmaga, C. Zopounidis (1999), *Business failure prediction using rough sets*, “European Journal of Operational Research” 114(2): 263–280, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00255-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00255-0); E. Zavadskas, Z. Turskis, *Multiple Criteria...*, op. cit.; C. Wu, Y. Yue, M. Li, O. Adjei (2004), *The rough set theory and applications*, “Engineering Computations” 21(5): 488–511, <https://doi.org/10.1108/02644400410545092>; Q. Zhang,

Teoria zbiorów przybliżonych oparta jest na założeniu, że obiekty, na przykład pojęcia, klasy decyzyjne, opisywane są przez zestaw atrybutów. Dokładność określenia wartości atrybutów determinuje rozróżnialność obiektów. W przypadku niemożliwości precyzyjnego (ściśłego) zdefiniowania zbioru obiektów zastępuje się je górnym i dolnym przybliżeniem zbioru. Różnica pomiędzy górnym i dolnym przybliżeniem jest obszarem granicznym. Im większy jest obszar graniczny, tym pojęcie staje się mniej precyzyjne²⁸¹. Inaczej mówiąc, w teorii zbiorów przybliżonych każdy obiekt można scharakteryzować poprzez określenie, że do danego zbioru na pewno należy, nie można wykluczyć, że do niego należy bądź że nie jest reprezentantem tego zbioru²⁸².

Podstawowa notacja zbiorów przybliżonych wykorzystuje następujące pojęcia:

- U – uniwersum, niepusty zbiór obiektów: $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;
- A – niepusty zbiór atrybutów: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, taki że $U \rightarrow V_a$, gdzie V_a zbiór wartości (dziedzina) atrybutu a ;
- SI – system informacyjny: $SI = \{U, A\}$;
- SD – system decyzyjny, szczególny przypadek systemu informacyjnego z atrybutem decyzyjnym: $SD = \{U, A, \{d\}\}$, gdzie d – zbiór możliwych decyzji dla obiektów z danego uniwersum U . Atrybuty w SD są warunkami pozwalającymi na określenie reguły decyzyjnej.

W zbiorach przybliżonych zakłada się istnienie obiektów tożsamyh (nierozróżnialnych) pod względem wartości danego zbioru atrybutów. Jednakże rozszerzenie zbioru atrybutu może spowodować, że staną się rozróżnialne. Relacja nierozróżnialności (ang. *indiscernibility relations* – *IND*) jest związana z każdym podzbiorem atrybutów. Relacja ta na zbiorze obiektów U , generowana przez podzbiór atrybutów B , dla $B \subseteq A$ określana jest jako²⁸³:

$$IND(B) = \{(x, x') \in U^2 : \bigwedge_{a \in B} a(x) = a(x')\}, \quad (2.1)$$

gdzie:

- $(x, x') \in U^2$ – obiekty należące do iloczynu kartezjańskiego zbioru uniwersum,
- $a(x), a(x')$ – wartość atrybutu a dla obiektów odpowiednio x i x' .

Jeżeli $(x, x') \in IND(B)$, to obiekty są tożsame względem relacji, czyli nierozróżnialne względem atrybutów podzbioru B . Oznacza to, że dla każdego ich atrybutu a z podzbioru atrybutów B wartości atrybutów są równe. Relacja nierozróżnialności jest relacją równoważności, gdyż jest:

Q. Xie, G. Wang (2016), *A survey on rough set theory and its applications*, "CAAI Transactions on Intelligence Technology" 1(4): 323–333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trit.2016.11.001>.

²⁸¹ Z. Pawlak, *Rough sets...*, op. cit.

²⁸² Z. Pawlak, *Rough sets: present state and...*, op. cit.

²⁸³ Z. Pawlak, A. Skowron (2007), *Rudiments of rough sets*, "Information Sciences" 177: 3–27, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.003>.

- zwrotna: $\bigwedge_{x \in U} (x, x) \in IND(B)$;
- symetryczna: $\bigwedge_{x, y \in U} ((x, y) \in IND(B) \Rightarrow (y, x) \in IND(B))$;
- przechodnia:
 $\bigwedge_{x, y, z \in U} ((x, y) \in IND(B) \wedge (y, z) \in IND(B) \Rightarrow (x, z) \in IND(B))$.

W niektórych zastosowaniach rozpatruje się nie system informacyjny, ale tak zwany system tolerancyjny, w którym relację nierozróżnialności, wykorzystującą relację równości, zastępuje się relacją tolerancji, rozumianą jako podobieństwo obiektów z uniwersum²⁸⁴.

Relacja nierozróżnialności (2.1) dzieli zbiór, w którym jest określona, na rozłączne podzbiory – klasy abstrakcji: $U/IND(B)$, czyli zbiory obiektów, które są nierozróżnialne ze względu na atrybuty ze zbioru B , nazywane też zbiorami elementarnymi tej relacji. Klasę abstrakcji, tj. zbiór obiektów o tych samych wartościach atrybutów B , oznaczany jako $[x]_B$, można zdefiniować następująco²⁸⁵:

$$[x]_B = \{x' \in U, \bigwedge_{a \in B} a(x) = a(x')\}. \quad (2.2)$$

Suma zbiorów elementarnych jest zbiorem definiowalnym, który jednoznacznie można scharakteryzować przez własności elementów. Jeżeli zbiór nie jest definiowalny, jest zbiorem przybliżonym²⁸⁶.

W zbiorach przybliżonych każdy zbiór obiektów X może być opisany za pomocą atrybutów ze zbioru B dokładnie lub w przybliżeniu za pomocą górnego i dolnego przybliżenia²⁸⁷.

Górna aproksymacja (ang. *B-upper approximation*) obejmuje te elementy, których klasy abstrakcji mają z rozpatrywanym zbiorem część wspólną niepustą:

$$\overline{B}(X) = \{x \in U: [x]_B \cap X \neq \emptyset\}. \quad (2.3)$$

Dolna aproksymacja (ang. *B-lower approximation*) zawiera obiekty na pewno należące do X :

$$\underline{B}(X) = \{x \in U: [x]_B \subset X\}. \quad (2.4)$$

Obszar brzegowy (ang. *B-boundary region*) zawiera obiekty nie mogące być jednoznacznie skasyfikowane jako obiekty X :

$$BN_B(X) = \overline{B}(X) - \underline{B}(X). \quad (2.5)$$

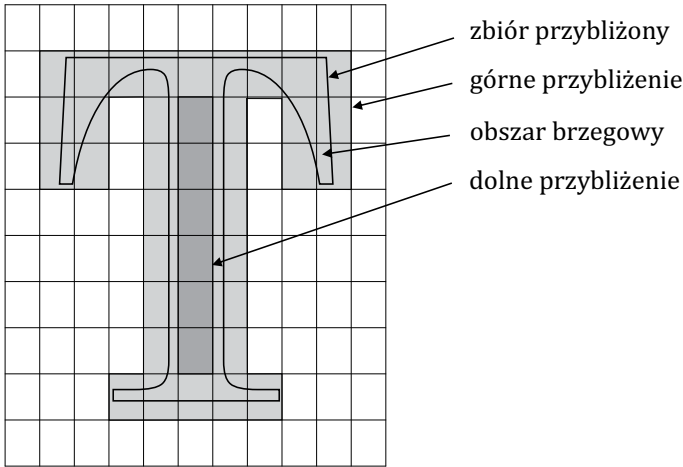
²⁸⁴ Z. Pawlak (1995), *Zbiory przybliżone. Nowa matematyczna metoda analizy danych: 1-13*, http://bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/1949/zb_przyb.pdf [1.11.2018].

²⁸⁵ Ibidem.

²⁸⁶ Ibidem.

²⁸⁷ Z. Pawlak (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, System Theory, "Knowledge Engineering and Problem Solving" 9(1), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3534-4>.

Zbiór jest przybliżony (ang. *rough set*), jeśli obszar brzegowy jest niepusty, w przeciwnym przypadku zbiór jest nazwany dokładnym (ang. *crisp set*)²⁸⁸. Graficzną reprezentację przedstawionych podstawowych pojęć zbiorów przybliżonych ilustruje rysunek 2.1.



Rysunek 2.1. Zbiór przybliżony i jego aproksymacja

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Z. Pawlak, A. Skowron (2007), *Rudiments of rough sets*, "Information Sciences" 177: 3–27, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.003>.

Jakość aproksymacji (ang. *accuracy of approximation*) wyraża wpływ doboru atrybutów na dokładność przybliżenia zbioru:

$$\alpha_B(X) = \frac{|\underline{B}(X)|}{|\overline{B}(X)|}, \quad (2.6)$$

gdzie: $|\underline{B}(X)|$ – moc zbioru, tj. liczba jego elementów, $card(\underline{B}(X))$.

Współczynnik α_B przyjmuje wartości: $0 \leq \alpha_B(X) \leq 1$, gdzie 1 charakteryzuje zbiór klasyczny, a wartości mniejsze od 1 zbiór przybliżony.

Dla każdego $X \subseteq U$ i $B \subseteq A$ można obliczyć dokładność dolnego – $\gamma_B(X)$ i górnego przybliżenia – $\gamma^B(X)$:

$$\gamma_B(X) = \frac{|\underline{B}(X)|}{|U|}, \quad (2.7)$$

$$\gamma^B(X) = \frac{|\overline{B}(X)|}{|U|}. \quad (2.8)$$

²⁸⁸ Ibidem.

W wypadku systemu decyzyjnego można oszacować zależność atrybutów decyzyjnych D od zbioru atrybutu C ²⁸⁹:

$$\gamma(C, D) = \frac{|POS_C(D)|}{|U|}, \quad (2.9)$$

gdzie:

$POS_C(D) = \cup_{X \in U/IND(D)} \underline{C}(X)$ – region pozytywny; zbiór elementów U , które mogą być jednoznacznie sklasyfikowane do U/D za pomocą odniesienia do C .

Na podstawie (2.9) można określić istotność atrybutu a ze zbioru C za pomocą formuły²⁹⁰:

$$\sigma_{(C,D)}(a) = \frac{(\gamma(C,D) - \gamma(C - \{a\}, D))}{\gamma(C,D)} = 1 - \frac{(\gamma(C - \{a\}, D))}{\gamma(C,D)}, \quad (2.10)$$

gdzie:

$0 \leq \sigma(a) \leq 1$ i przyjmuje tym większe wartości, im większe jest znaczenie atrybutu.

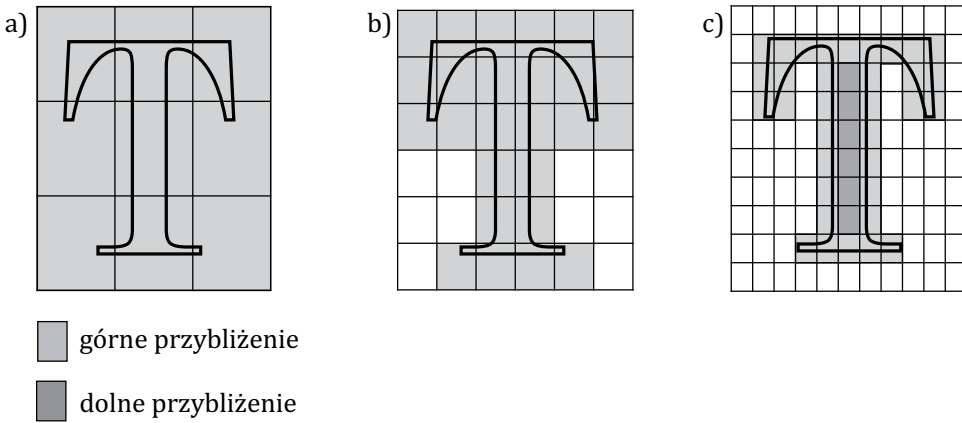
Zbiory przybliżone można skategoryzować ze względu na zakres górnego i dolnego przybliżenia na zbiory:

- B -definiowalne: $\underline{B}(X) \neq \emptyset$ i $\overline{B}(X) \neq U$;
- wewnątrznie B -niedefiniowalne: $\underline{B}(X) = \emptyset$ i $\overline{B}(X) \neq U$;
- zewnątrznie B -niedefiniowalne: $\underline{B}(X) \neq \emptyset$ i $\overline{B}(X) = U$;
- całkowicie niedefiniowalne: $\underline{B}(X) = \emptyset$ i $\overline{B}(X) = U$.

Zwiększenie dokładności pomiarów, zwanej w teorii granulacją, może zmienić typ zbioru, co zostało zilustrowane na rysunku 2.2.

²⁸⁹ Z. Pawlak (2004), *Some Issues on Rough Sets*, w: J.F. Peters, A. Skowron, J.W. Grzymała-Busse, B. Kostek, R.W. Świniarski, M.S. Szczuka (red.), *Transactions on Rough Sets I*, "Lecture Notes in Computer Science" vol. 3100, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 1–58, https://doi.org/10.1007/978-3-540-27794-1_1.

²⁹⁰ Ibidem.



Rysunek 2.2. Zbiór przybliżony i jego aproksymacja: a) zbiór całkowicie niedefiniowalny, b) wewnątrznie B-niedefiniowalny i c) B-definiowalny

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Z. Pawlak, A. Skowron (2007), *Rudiments of rough sets*, "Information Sciences" 177: 3–27; D. Liu, T. Li, J. Zhang (2015), *Incremental updating approximations in probabilistic rough sets under the variation of attributes*, "Knowledge-Based Systems" 73: 81–96, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.09.008>.

Przedstawiając podstawy zbiorów przybliżonych, warto odnieść się do najpopularniejszego dotychczas podejścia do opisu zjawisk i wielkości niepewnych lub nieprecyzyjnie określonych w projektach oceny technologii, jakim są zbiory rozmyte L.A. Zadeha²⁹¹. W literaturze dyskusję różnic pomiędzy zbiorami przybliżonymi i rozmytymi podjęli między innymi: Z. Pawlak²⁹², D. Dubois i H. Prade²⁹³, A.M. Radzikowska i E.E. Kerre²⁹⁴. Najogólniej można zreferować, że zbiory rozmyte w niepustej przestrzeni bazują na funkcji przynależności przyjmującej wartości z przedziału $[0,1]$ ²⁹⁵:

$$\mu_A(x) \in [0,1], \quad (2.11)$$

gdzie:

- A – zbiór,
- x – element zbioru.

²⁹¹ L.A. Zadeh, *Fuzzy sets. A Aristotle's Syllogistic...*, op. cit.

²⁹² Z. Pawlak (1985), *Rough sets and fuzzy sets*, "Fuzzy Sets and Systems" 17(1): 99–102, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(85\)80029-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(85)80029-4).

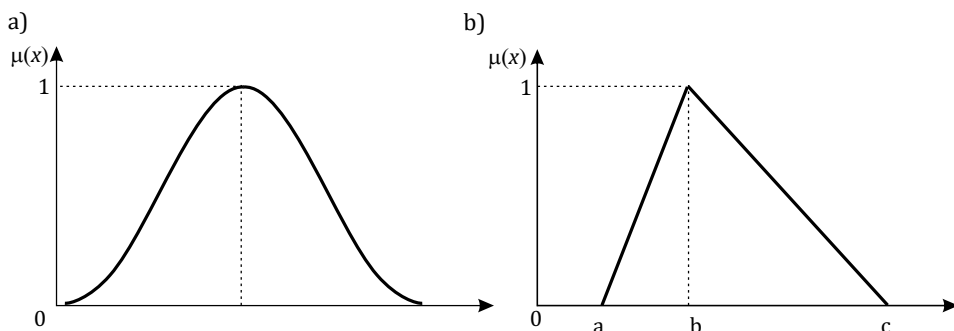
²⁹³ D. Dubois, H. Prade, *Rough Fuzzy...*, op. cit.

²⁹⁴ A.M. Radzikowska, E.E. Kerre (2002), *A comparative study of fuzzy rough sets*, "Fuzzy Sets and Systems" 126(2): 137–155, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(01\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(01)00032-X).

²⁹⁵ A. Piegat (2001), *Fuzzy Modeling and Control*, Springer, s. 14.

Wykorzystanie funkcji przynależności wiąże się zawsze z podstawowym problemem wyboru metody jej konstrukcji²⁹⁶.

Dwie przykładowe funkcje przynależności: trójkątną, chyba najbardziej powszechną, oraz Gaussowską wraz ze wzorami zilustrowano na rysunku 2.3.



Rysunek 2.3. Wybrane funkcje przynależności: a) trójkątna, b) Gaussowska

Źródło: opracowanie własne na podstawie: M.S. Lolea, S. Dzitac (2018), *A few categories of electromagnetic field problems treated through Fuzzy Logic*, IOP Conf. Series: “Materials Science and Engineering” 294, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012093>; A. Piegat (2001), *Fuzzy Modeling and Control*, Springer, s. 43.

Podstawowe operacje na zbiorach rozmytych: iloczyn i sumę można zdefiniować jako²⁹⁷:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (2.12)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)). \quad (2.13)$$

W wypadku zbioru przybliżonego również można wprowadzić funkcję przynależności wyrażającą stopień, w jakim x należy do X , ze względu na informację o x wyrażoną przez podzbiór atrybutów B ²⁹⁸:

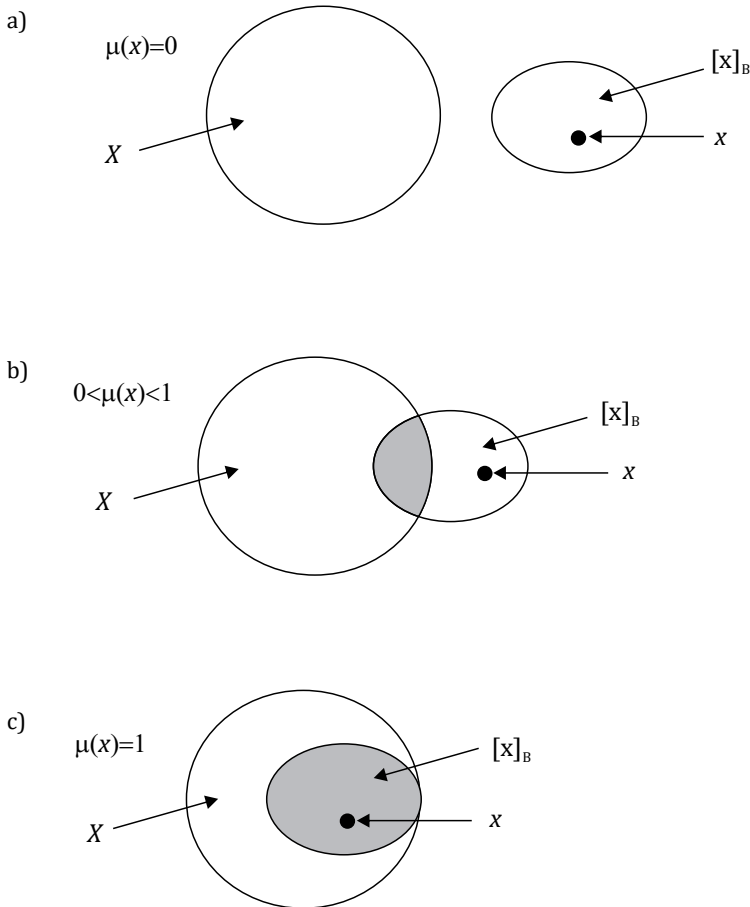
$$\mu_X(x) = \frac{|[x]_{B \cap X}|}{|[x]_B|}. \quad (2.14)$$

Została ona przedstawiona na rysunku 2.4.

²⁹⁶ O. Hryniewicz (2010), *Funkcja przynależności zbioru rozmytego – metody konstrukcji i interpretacji*, Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, Seria: „Studia i Materiały” 31, s. 8–17.

²⁹⁷ D. Dubois, H. Prade (1980), *Fuzzy Sets and Systems*, “Theory and Applications, Mathematics in Science and Engineering” 144, Academic Press, s. 10.

²⁹⁸ Z. Pawlak, A. Skowron (1994), *Rough membership functions*, w: R. Yaeger, M. Fedrizzi, J. Kacprzyk (red.), *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence*, John Wiley and Sons, Inc., New York, s. 251–271.



Rysunek 2.4. Ilustracja funkcji przynależności w zbiorach przybliżonych: a) $\mu(x)=0$, b) $0 < \mu(x) < 1$, c) $\mu(x)=1$

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Z. Pawlak, *Rough Sets*, zmodyfikowana wersja wykładów prowadzonych na Uniwersytecie w Tarragona w ramach seminarium na temat języków formalnych i zbiorów przybliżonych w sierpniu 2003 r., <http://bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/2026/RoughSetsRep29.pdf>.

Zdefiniowanie funkcji przynależności dla zbioru przybliżonego $X \subseteq U$: $\mu_X(x): U \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$, na przykład typu²⁹⁹:

$$\mu_X(x) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } x \in \underline{B}(X) \\ \frac{1}{2}, & \text{jeżeli } x \in BN_B(X), \\ 0, & \text{jeżeli } x \in -\bar{B}(X) \end{cases} \quad (2.15)$$

²⁹⁹ Z. Pawlak, *Rough sets and fuzzy sets...*, op. cit.

nie pozwoli na zgodną ze zbiorami rozmytymi definicję sumy i iloczynu, gdyż dla zbiorów przybliżonych³⁰⁰:

$$\mu_{X \cup Y}(x) \geq \max(\mu_X(x), \mu_Y(x)) \quad (2.16)$$

oraz

$$\mu_{X \cap Y}(x) \leq \min(\mu_X(x), \mu_Y(x)). \quad (2.17)$$

Tym samym można przyjąć, że funkcja przynależności zbioru przybliżonego jest pewnym uogólnieniem funkcji przynależności zbioru rozmytego. Koncepcja zbiorów przybliżonych redukuje się do zbiorów rozmytych tylko wówczas, jeżeli zamiast zależności $\underline{B}(X \cup Y) \supseteq \underline{B}(X) \cup \underline{B}(Y)$ oraz $\overline{B}(X \cap Y) \subseteq \overline{B}(X) \cap \overline{B}(Y)$ byłyby prawdziwe, odpowiednio: $\underline{B}(X \cup Y) = \underline{B}(X) \cup \underline{B}(Y)$ i $\overline{B}(X \cap Y) = \overline{B}(X) \cap \overline{B}(Y)$. Połączenie obu podejść w literaturze występuje pod nazwą rozmytych przybliżonych zbiorów (ang. *Fuzzy Rough Sets*)³⁰¹.

Popularnym zastosowaniem zbiorów przybliżonych jest upraszczanie systemów decyzyjnych³⁰². Ogromna liczba informacji gromadzonych obecnie w różnorodnych bazach wymusza stosowanie wydajnych i skutecznych technik eksploracji danych. Nawet gdy możliwe jest zignorowanie problemu złożoności obliczeniowej (np. w sytuacji wystarczającej mocy obliczeniowej wykorzystywanych urządzeń), korzystanie z nadmiernie rozbudowanych systemów wnioskujących, złożonych z licznych wzajemnie powiązanych zestawów reguł, może utrudniać lub wręcz uniemożliwiać dopasowywanie i klasyfikację nowych obiektów³⁰³. Ocena ważności przetwarzanych zmiennych dla jakości decyzji i eliminacja nieistotnych pozwalają w wielu wypadkach znacząco uprościć algorytmy. Zastosowanie do tego celu zbiorów przybliżonych zasada się na eliminacji atrybutów, których wartości nie mają wpływu na atrybuty decyzyjne. Przyjmuje się, że atrybut a jest zbędny (zależny), jeżeli dla $C \subseteq A$ i $a \subseteq C$ zachodzi:

$$IND(C) = IND(C - \{a\}). \quad (2.18)$$

³⁰⁰ Z. Pawlak, A. Skowron, *Rough membership functions...*, op. cit.

³⁰¹ C. Cornelis, M. De Cock, A.M. Radzikowska (2008), *Fuzzy rough sets: from theory into practice*, w: W. Pdrycz, A. Skowron, V. Kreinovich (red.), *Handbook of Granular Computing*, Wiley, s. 533–552; Y.Y. Yao (1997), *Combination of Rough and Fuzzy Sets Based on α -Level Sets*, w: T.Y. Lin, N. Cercone (red.), *Rough Sets and Data Mining*, Springer, Boston, MA, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1461-5_15.

³⁰² R.W. Świniarski, A. Skowron (2003), *Rough set methods in feature selection and recognition*, "Pattern Recognition Letters" 24(6), 833–849, [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(02\)00196-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(02)00196-4).

³⁰³ Q. Huang, J. Wang, H. Su, L. Yang, Z. Ding, G. Zhang (2016), *A fault feature reduction method based on rough set attribute reduction and principal component analysis*, "Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC)": 6629–6633, <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554399>.

Zbiór atrybutów B jest niezbędny (niezależny), jeżeli dla każdego $a \subseteq B$ a jest niezbędny. Zbiór $B \subseteq A$, jeżeli B jest niezależny oraz $IND(B) = IND(A)$ nazywany jest reduktom A . Rdzeń (jądro, ang. *Core*) to zbiór wszystkich niezbędnych atrybutów w B (przekrój reduktów):

$$CORE(B) = \cap RED(B), \quad (2.19)$$

gdzie: $RED(B)$ – zbiór wszystkich reduktów B .

Liczba możliwych reduktów wyraża się dwumianem³⁰⁴:

$$\binom{m}{2}, \quad (2.20)$$

gdzie:

m – liczba atrybutów,

$\left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor$ – iloraz zaokrąglony w dół do liczby całkowitej.

Algorytmy znajdowania wszystkich reduktów czy wyznaczania reduktu o możliwie najmniejszej liczbie atrybutów są zaliczane do problemów NP-trudnych³⁰⁵. Tym samym sposoby redukcji atrybutów są podstawowymi zagadnieniami teorii zbiorów przybliżonych³⁰⁶. W celu wyznaczania reduktów i indukcji reguł decyzyjnych proponowane są rozmaite algorytmy³⁰⁷, w tym genetyczne³⁰⁸,

³⁰⁴ P. Szczuko, B. Kostek (2015), *Sztuczna inteligencja w medycynie. Skrypt do projektu z przedmiotu*, Politechnika Gdańska, międzywydziałowy kierunek inżynieria biomedyczna, https://so-und.eti.pg.gda.pl/student/sim/instrukcja_projekt.pdf [12.10.2018]; J.G. Bazan (1998), *Metody wnioskowań aproksymacyjnych dla syntezy algorytmów decyzyjnych*, praca doktorska, Uniwersytet Warszawski, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki Instytut Matematyki, http://fenix.univ.rzeszow.pl/bazan/bazan_dr.pdf [21.10.2018].

³⁰⁵ K. Gao (2008), *Predicting Grid Performance Based on Novel Reduct Algorithm*, w: I. Lovrek, R.J. Howlett, L.C. Jain (red.), *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, KES 2008*, "Lecture Notes in Computer Science" 5178, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 289-296, https://doi.org/10.1007/978-3-540-85565-1_36; analizę złożoności algorytmów można odnaleźć m.in. w pracy doktorskiej: T. Strąkowski (2008), *Algorytmy równoległe na potrzeby Zbiorów Przybliżonych*, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych.

³⁰⁶ N. Xu, Y. Zhang, Y. Yu (2007), *A Simple Reduction Analysis and Algorithm Using Rough Sets*, w: M. Kryszkiewicz, J.F. Peters, H. Rybinski, A. Skowron (red.), *Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms, RSEISP 2007*, "Lecture Notes in Computer Science" 4585, Springer, Berlin, Heidelberg; J.G. Bazan, *Metody wnioskowań...*, op. cit.

³⁰⁷ N. Xu, Y. Zhang, Y. Yu, *A Simple Reduction Analysis...*, op. cit.; J.G. Bazan, *Metody wnioskowań aproksymacyjnych...*, op. cit.; E. Chodakowska, J. Nazarko (2019), *Rough Sets and DEA – a hybrid model for technology assessment* (w druku).

³⁰⁸ J. Wróblewski (1998), *Genetic Algorithms in Decomposition and Classification Problems*, w: L. Polkowski A. Skoworn (red.), *Rough Sets in Knowledge Discovery 2*, "Studies in Fuzziness and Soft Computing 19. Physica", Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1883-3_24.

heurystyczne³⁰⁹, oraz ich komputerowe implementacje³¹⁰. Warto zaznaczyć, że redukcja atrybutów wiąże się z dodatkową koniecznością dyskretyzacji parametrów, gdy obiekty w systemie decyzyjnym są opisane atrybutami liczbowymi z ciągłej dziedziny i tym samym wyborem odpowiedniej metody dyskretyzacji.

Podsumowując, teoria zbiorów przybliżonych, niewymagająca specjalnych założeń co do danych i rozkładu prawdopodobieństwa, a także charakteryzująca się stosunkową prostotą matematyczną, znalazła liczne zastosowania. Oprócz wspomnianego określenia minimalnego istotnego zbioru danych (reduktów)³¹¹ wykorzystywana jest do wyszukiwania wzorców ukrytych w danych, a także do generowania reguł decyzyjnych³¹². Dziedziny zastosowań zbiorów przybliżonych to między innymi: teoria decyzji³¹³, ekonomia³¹⁴, a przede wszystkim medycyna.

³⁰⁹ T.Y. Lin, P. Yin (2004), *Heuristically Fast Finding of the Shortest Reducts*, w: S. Tsumoto, R. Słowiński, J. Komorowski, J.W. Grzymała-Busse, *Rough Sets and Current Trends in Computing*, RSCTC 2004, "Lecture Notes in Computer Science" 3066, Springer, Berlin, Heidelberg; D. Ślęzak (2006), *Association Reducts: Complexity and Heuristics*, w: S. Greco, Y. Hata, S. Hirano, M. Inuiguchi, S. Miyamoto (red.), *Proceedings of the 5th International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing (RSCTC'06)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 157–164, http://dx.doi.org/10.1007/11908029_1; N. Zhong, J. Dong, S. Ohsuga (2001), *Using Rough Sets with Heuristics for Feature Selection*, "Journal of Intelligent Information Systems" 16(3): 199–214, <https://doi.org/10.1023/A:1011219601502>; S.X. Wu, M.Q. Li, W.T. Huang, S.F. Liu (2004), *An improved heuristic algorithm of attribute reduction in rough set*, "Journal of System Sciences and Information" 2(3): 557–562, <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2005.1527482>.

³¹⁰ Z. Abbas, A. Burney (2016), *A Survey of Software Packages Used for Rough Set Analysis*, "Journal of Computer and Communications" 4(09):10–18, <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.49002>.

³¹¹ M. Ningler, G. Stockmanns, G. Schneider, H.-D. Kochs, E. Kochs (2009), *Adapted variable precision rough set approach for EEG analysis*, "Artificial Intelligence in Medicine" 47(3): 239–261, <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2009.07.004>.

³¹² S. Tsumoto (1998), *Automated extraction of medical expert system rules from clinical databases based on rough set theory*, "Information Sciences" 112(1–4): 67–84, [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(98\)10021-X](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(98)10021-X); S. Tsumoto (2004), *Mining diagnostic rules from clinical databases using rough sets and medical diagnostic model*, "Information Sciences" 162(2): 65–80, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2004.03.002>; L. Kuncheva (1992), *Fuzzy Rough Sets - Application To Feature-Selection*, "Fuzzy Sets And Systems" 51(2): 147–153, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(92\)90187-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90187-9).

³¹³ Z. Pawlak, R. Słowiński (1994), *Decision analysis using rough sets*, "International Transactions in Operational Research" 1(1): 107–114, <https://doi.org/10.1111/1475-3995.d01-12>; S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński, *Rough sets theory...*, op. cit.; Z. Pawlak, R. Słowiński (1994), *Rough Set Approach to Multiattribute Decision-Analysis*, "European Journal of Operational Research" 72(3): 443–459, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90415-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90415-4); X. Ma, Q. Liu, J. Zhan (2017), *A survey of decision making methods based on certain hybrid soft set models*, "Artificial Intelligence Review" 47(4): 507–530, <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9490-x>.

³¹⁴ R. Słowiński, C. Zopounidis (1995), *Application of the rough set approach to evaluation of bankruptcy risk*, "International Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management" 4(1): 27–41, <https://doi.org/10.1002/j.1099-1174.1995.tb00078.x>; P. Ravi Kumar, V. Ravi (2007), *Bankruptcy prediction in banks and firms via statistical and intelligent techniques – A review*, "European Journal of Operational Research" 180(1): 1–28, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.043>; Y.F. Wang (2003), *Mining stock price using fuzzy rough set system*, "Expert Systems with Applications"

Podstawowe zastosowania w naukach medycznych³¹⁵ to diagnostyka na podstawie obrazów (uzyskanych w badaniu metodą rezonansu magnetycznego³¹⁶, tomografii komputerowej³¹⁷, zapisów EKG³¹⁸) oraz klasyfikacja przypadków medycznych (np. raka prostaty³¹⁹, nowotworów żołądka³²⁰, dojrzałości szkieletu³²¹, chorób sercowo-naczyniowych³²², w tym zastawek serca³²³). Metody zbiorów przybliżonych wykorzystywane są do określenie efektów terapeutycznych (np. hemodializy³²⁴, le-

24(1):13-23, [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00079-9); L. Shen, H.T. Loh (2004), *Applying rough sets to market timing decisions*, "Decision Support Systems" 37(4): 583-597, [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(03\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(03)00089-7); R. Słowiński, C. Zopounidis, A.I. Dimitras (1997), *Prediction of company acquisition in Greece by means of the rough set approach*, "European Journal of Operational Research" 100(1): 1-15, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00110-5); K.Y. Shen, G.H. Tzeng (2015), *A new approach and insightful financial diagnoses for the IT industry based on a hybrid MADM model*, "Knowledge-Based Systems" 85: 112-130, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.04.024>.

³¹⁵ Na podstawie przeglądu artykułów opublikowanych tylko w latach 2016-2018 i indeksowanych w Web of Science.

³¹⁶ S. Roy, P. Maji (2018), *An accurate and robust skull stripping method for 3-D magnetic resonance brain images*, "Magnetic Resonance Imaging" 54: 46-57, <https://doi.org/10.1016/j.mri.2018.07.014>; K.Y. Lim, R. Mandava (2018), *A multi-phase semi-automatic approach for multi-sequence brain tumor image segmentation*, "Expert Systems with Applications" 112: 288-300, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.041>; Y.K. Dubey, M.M. Mushrif, K. Mitra (2016), *Segmentation of brain MR images using rough set based, intuitionistic fuzzy clustering*, "Biocybernetics and Biomedical Engineering" 36(2): 413-426, <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2016.01.001>.

³¹⁷ Z. Zheng, X. Zhang, H. Xu, W. Liang, S. Zheng, Y. Shi (2018), *A Unified Level Set Framework Combining Hybrid Algorithms for Liver and Liver Tumor Segmentation in CT Images*, "Biomed Research International": 3815346, <https://doi.org/10.1155/2018/3815346>.

³¹⁸ S.S. Kumar, H.H. Inbarani (2017), *Covering rough set-based classification for cardiac arrhythmia*, "International Journal of Intelligent Engineering Informatics" 5(2): 101-120, <http://dx.doi.org/10.1504/IJIEI.2017.084167>.

³¹⁹ R.J. Kuo, P.Y. Su, F.E. Zulvia, C.C. Lin (2018), *Integrating cluster analysis with granular computing for imbalanced data classification problem - A case study on prostate cancer prognosis*, "Computers & Industrial Engineering" 125: 319-332, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.031>.

³²⁰ H. Midelfart, J. Komorowski, K. Norsett, F. Yadetie, A.K. Sandvik, A. Laegreid (2002), *Learning rough set classifiers from gene expressions and clinical data*, "Fundamenta Informaticae" 53(2): 155-1832.

³²¹ R. Garza-Morales, F. Lopez-Irarragori, R. Sanchez (2016), *On the application of rough sets to skeletal maturation classification*, "Artificial Intelligence Review" 45(4): 489-508, <https://doi.org/10.1007/s10462-015-9450-x>.

³²² S.B. Chaudhuri, M. Rahman (2018), *Design of a Medical Expert System (MES) Based on Rough Set Theory for Detection of Cardiovascular Diseases*, w: K. Saeed, N. Chaki, B. Pati, S. Bakshi, D. Mohapatra (red.), *Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering*, "Advances in Intelligent Systems and Computing" 563: 325-332, https://doi.org/10.1007/978-981-10-6872-0_30.

³²³ A.T. Azar, S.S. Kumar, H.H. Inbarani, A.E. Hassanien (2016), *Pessimistic multi-granulation rough set-based classification for heart valve disease diagnosis*, "International Journal of Modelling Identification and Control" 26(1): 42-51, <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2016.077744>.

³²⁴ Y.S. Chen (2016), *An empirical study of a hybrid imbalanced-class DT-RST classification procedure to elucidate therapeutic effects in uremia patients*, "Medical & Biological Engineering & Computing" 54(6): 983-1001, <https://doi.org/10.1007/s11517-016-1482-0>.

czenia przeciwwirusowego HIV/AIDS³²⁵). Warto podkreślić, że w rozwiązaniach aplikacyjnych wielokrotnie nie są rozpatrywane jako alternatywa w stosunku do istniejących metod analizy danych, a raczej jako ich uzupełnienie³²⁶.

Równoległe obok zastosowań praktycznych następował rozwój metody, powstały różne jej rozszerzenia/uogólnienia³²⁷. Wśród nich przywołać można zbiory przybliżone ze zmienną precyzją (ang. *Variable Precision Rough Sets* – VPRS³²⁸), w których wprowadza się przybliżenia o zmiennej precyzji – π i względną miarę nakładania się klasy równoważności, definiując górne i dolne przybliżenia odpowiednio:

$$\bar{B}_\pi(X) = \left\{ x \in U: \frac{|[x]_{B \cap X}|}{|[x]_B|} \geq 1 - \pi \right\}, \quad (2.21)$$

$$\underline{B}_\pi(X) = \left\{ x \in U: \frac{|[x]_{B \cap X}|}{|[x]_B|} \geq \pi \right\}. \quad (2.22)$$

Wśród innych rozszerzeń, za M. Podsiadło³²⁹, wymienić można: zbiory przybliżone oparte na relacji dominacji (ang. *Dominance-based Rough Sets* – DRS)³³⁰ czy

³²⁵ Y.S. Chen (2016), *A comprehensive identification-evidence based alternative for HIV/AIDS treatment with HAART in the healthcare industries*, "Computer Methods and Programs in Biomedicine" 131: 111–126, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.04.001>.

³²⁶ H.H. Inbarani, A.T. Azar, G. Jothi (2014), *Supervised hybrid feature selection based on PSO and rough sets for medical diagnosis*, "Computer Methods and Programs in Biomedicine" 113(1): 175–185, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.10.007>; A.E. Hassanien, A. Abraham, J.F. Peters, G. Schaefer, C. Henry (2009), *Rough Sets and Near Sets in Medical Imaging: A Review*, "IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine" 13 (6): 955–968, <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2017017>; Z. Zhang, Y. Shi, G. Gao (2009), *A rough set-based multiple criteria linear programming approach for the medical diagnosis and prognosis*, "Expert Systems with Applications" 36(5): 8932–8937, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.007>; S. Ubukata, K. Umado, A. Notsu, K. Honda (2018), *Characteristics of Rough Set C-Means Clustering*, "Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics" 22(4): 551–564, <https://doi.org/10.20965/jaciii.2018.p0551>; R. Cheruku, D.R. Edla, V. Kuppili, R. Dharavath (2018), *RST-BatMiner: A fuzzy rule miner integrating rough set feature selection and Bat optimization for detection of diabetes disease*, "Applied Soft Computing" 67: 76–780, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.032>; A. Nambura, S.K. Samay, S.R. Edara (2017), *Soft fuzzy rough set-based MR brain image segmentation*, "Applied Soft Computing" 54: 456–466, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.08.020>; Y. Zhang, S. Ye, W. Ding (2017), *Based on rough set and fuzzy clustering of MRI brain segmentation*, "International Journal of Biomathematics" 10(2): 1750026, <https://doi.org/10.1142/S1793524517500267>.

³²⁷ Z. Pawlak, A. Skowron (2007), *Rough sets: Some extensions*, "Information Sciences" 177: 28–40, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.006>.

³²⁸ W. Ziarko (1993), *Variable precision rough set model*, "Journal of Computer and System Sciences" 46(1): 39–59, [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(93\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0022-0000(93)90048-2).

³²⁹ M. Podsiadło (2016), *Forecasting Financial Time Series Movements with Rough Sets and Fuzzy Rough Sets*, PhD Thesis Warsaw University of Technology, Faculty of Electronics and Information Technology Warsaw, <https://depotuw.ceon.pl/bitstream/handle/item/607/dissertationMain.pdf?sequence=1> [26.10.2018].

³³⁰ S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński (1999), *Rough approximation of a preference relation by dominance relations*, "European Journal of Operational Research" 117(1): 63–83, [https://doi.org/10.1016/S0377-3217\(99\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0377-3217(99)00048-2).

tolerancyjne modele zbiorów przybliżonych (ang. *Tolerance Rough Sets* – TRS)³³¹. Rozszerzenia te generalnie modyfikują definicje przybliżeń zbiorów, umożliwiając włączanie do nich obiektów o „wystarczającym” stopniu spójności.

Podstawowe, postulowane w monografii, zastosowanie zbiorów przybliżonych w ocenie technologii zawiera się w redukcji kryteriów jej oceny³³². Złożoność problemu oceny technologii implikuje rozbudowane kwestionariusze oceny, lecz jednocześnie często występuje ścisła współzależność między poszczególnymi odpowiedziami. Teoria zbiorów przybliżonych z powodzeniem może być zastosowana w celu zmniejszenia liczby kryteriów (wymiarów oceny) – atrybutów – i usunięcia nieistotnych, pokrywających się informacji³³³. Ponadto dodatkowe zastosowanie lokuje się w modelowaniu niepewności lingwistycznej, zastępowaniu nieprecyzyjnych pojęć oceny technologii za pomocą dolnego i górnego przybliżenia³³⁴.

2.2. Podstawy *Data Envelopment Analysis*

Data Envelopment Analysis (DEA) jest techniką programowania liniowego pozwalającą badać względną efektywność działania jednostek decyzyjnych (ang. *Decision Making Unit* – DMU). Rozwój metody zapoczątkowała publikacja A. Charnesa, W.W. Coopera i E. Rhodesa³³⁵, która powstała na podstawie wcześniejszej pracy M.J. Farrella³³⁶ i jego koncepcji „granicy efektywności” wyznaczonej przez najefektywniejsze w analizowanym zbiorze jednostki (ang. *best practise frontier*). Od momentu opracowania DEA stała się jedną z najpopularniejszych nieparametrycznych metod pomiaru efektywności. Stale powiększająca się bibliografia metody DEA potwierdza jej użyteczność w zakresie badania efektywności obiektów o dowolnej złożoności z niemal wszystkich sektorów gospodarki³³⁷.

Koncepcja oceny technologii za pomocą metody DEA zakłada możliwość oceny za pomocą relacji efektywności. Efektywność należy do podstawowych kategorii ekonomicznych, posiadających liczny zbiór desygnatów w pracach na-

org/10.1016/S0377-2217(98)00127-1.

³³¹ A. Skowron, J. Stepaniuk (1996), *Tolerance approximation spaces*, „Fundamenta Informaticae” 27(2/3): 245–253, <https://doi.org/10.3233/FI-1996-272311>.

³³² E. Chodakowska, J. Nazarko, *Rough Sets and DEA...*, op. cit.

³³³ Ibidem.

³³⁴ E. Chodakowska, *Koncepcja analizy...*, op. cit.

³³⁵ A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes (1978), *Measuring the efficiency of decision-making units*, „European Journal of Operational Research” 2(6): 429–444, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).

³³⁶ M.J. Farrell (1957), *The Measurement of Productive Efficiency*, „Journal of the Royal Statistical Society”. Series A (General) 120(3): 253–290, <https://doi.org/10.2307/2343100>.

³³⁷ W bazie WoS indeksowanych jest 19275 dokumentów związanych z DEA (TOPIC: DEA or “Data Envelopment Analysis”), w bazie Scopus: 23247 (TITLE-ABS-KEY: DEA or “Data Envelopment Analysis”) [2.11.2018].

ukowych, niekiedy utożsamiana jest z produktywnością. Zgodnie z podejściem technicznym pojęcie efektywności oznacza najlepsze rezultaty osiągnięte po najniższych kosztach³³⁸. W zasadzie miernikiem efektywności może być każdy wskaźnik w postaci ilorazu, w którym w liczniku występuje dowolnie wyrażony efekt, a w mianowniku wielkość zasobów zużytych lub wykorzystywanych do uzyskania tego efektu³³⁹.

W literaturze czytelne rozróżnienie produktywności i efektywności w aspekcie aparatu matematycznego zaproponował S.C. Ray³⁴⁰, definiując produktywność obiektu j (P_j) jako iloraz:

$$P_j = \frac{y_j}{x_j}, \quad (2.23)$$

gdzie:

y_j, x_j – wynik i nakład obiektu j .

Natomiast techniczną efektywność (TE_j) zdefiniował jako relację wyniku do maksymalnego możliwego wyniku osiąganego przy danym poziomie ponoszonych nakładów (mowa jest wówczas o orientacji na wyniki – TE_j^O , ang. *input oriented*) lub wielkości minimalnych nakładów potrzebnych do uzyskania danych efektów do wielkości nakładów ponoszonych (orientacja na nakłady – TE_j^I , ang. *output oriented*):

$$TE_j^O = \frac{y_j}{y_j^*}, \quad (2.24)$$

$$TE_j^I = \frac{x_j^*}{x_j}, \quad (2.25)$$

gdzie:

y_j – wynik obiektu j ,

x_j – nakład obiektu j ,

x_j^* – minimalny możliwy nakład niezbędny do osiągnięcia wyniku y_j ,

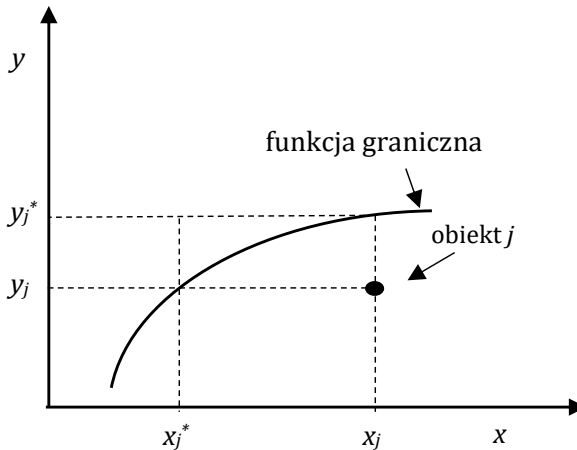
y_j^* – maksymalny możliwy wynik osiągalny przy nakładzie x_j .

³³⁸ Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/index.php/Efektywno-%C5%9B%C4%87> [16.07.2018].

³³⁹ E. Chodakowska (2012), *Ocena efektywności działania szkół gimnazjalnych metodą Data Envelopment Analysis na przykładzie powiatu grodzkiego Białystok*, praca doktorska, Uniwersytet Warszawski, Wydział Zarządzania, za: A. Kosieradzka (2004), *Metoda wielokryterialnej oceny produktywności*, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” 2, PTZP, s. 37–45; H.D. Sherman, J. Zhu (2006), *Improving Service Performance using Data Envelopment Analysis (DEA)*, “Service Productivity Management”, Springer, s. 51, <https://doi.org/10.1007/0-387-33231-6>.

³⁴⁰ S.C. Ray (2004), *Data Envelopment Analysis. Theory and Techniques for Economics and Operations Research*, Cambridge University Press, s. 15–22.

Maksymalny, możliwy do osiągnięcia wynik uzyskiwany przy różnych nakładach bądź minimalny nakład dla różnych poziomów wyników obliczane są na podstawie skonstruowanej i dopasowanej analitycznej granicznej funkcji lub za pomocą modeli nieparametrycznych (do których należy metoda DEA), wykorzystujących informacje charakteryzujące badane podmioty. Ilustrację wzorów (2.24–2.25) przedstawiono na wykresie na rysunku 2.5.

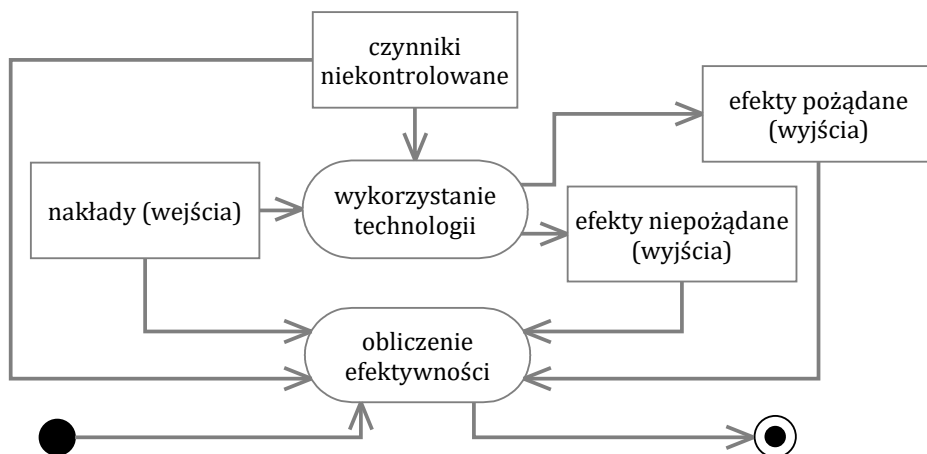


Rysunek 2.5. Efektywność zorientowana na nakłady i wyniki (jeden nakład i wynik, stałe efekty skali)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: S.C. Ray, *Data Envelopment Analysis...*, op. cit., s. 21; R. Ramanathan (2003), *An introduction to Data Envelopment Analysis: a tool for performance measurement*, Sage Publications, New Delhi, s. 60; W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone (2007), *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Second Edition, Springer, s. 5.

Metoda DEA wykorzystuje ideę technicznej efektywności S.C. Raya³⁴¹ i ocenia działalność obiektu, biorąc pod uwagę relację jego funkcji efektów i nakładów (określanych w metodzie jako wyjścia – ang. *output* i wejścia – ang. *input*) w stosunku do wartości tej relacji u innych podmiotów objętych badaniem. Odnosząc koncepcję metody do oceny technologii, punktem wyjścia jest założenie, że technologię można potraktować jako jednostkę decyzyjną i scharakteryzować przez zasoby wejściowe, efekty, także te niepożądane, ale nieuniknione, procesy transformacji, przekształcające zasoby w efekty, oraz czynniki środowiskowe, wynikające z wpływu otoczenia (uwzględnienie efektów niepożądanych oraz czynników środowiskowych jest opcjonalne). Koncepcję oceny technologii za pomocą DEA przedstawiono na rysunku 2.6.

³⁴¹ S.C. Ray, *Data Envelopment Analysis...*, op. cit.

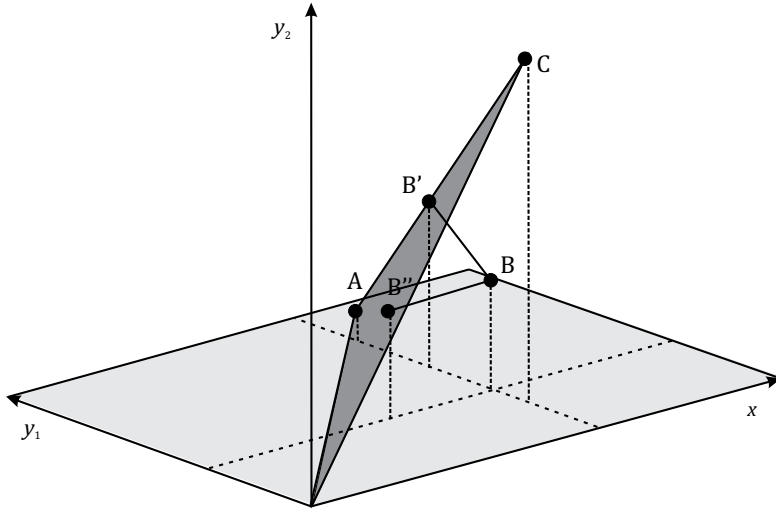


Rysunek 2.6. Koncepcja oceny technologii za pomocą DEA uwzględniająca niepożądane efekty i czynniki niekontrolowane

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Chodakowska, J. Nazarko (2017), *Environmental DEA method for assessing productivity of European countries*, "Technological and Economic Development of Economy" 23(4): 589–607, <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2016.1272069>.

Metoda przy ograniczonej liczbie wejść i wyjść może być przedstawiona i rozwiązana graficznie. W pełni efektywne jednostki tworzą granicę efektywności, zaś możliwość poprawy nieefektywnych jednostek jest określana poprzez odniesienie ich wyników do granicy. Przypadek dotyczący jednego wejścia i dwóch (pożądanych) wyjść przedstawiono na rysunku 2.7. Jednostki A, B i C charakteryzują identyczne nakłady, ale różne wartości wyników. Jednostki A i C tworzą granicę możliwości produkcyjnych. Nieefektywną jednostką B można ocenić, odnosząc się do referencyjnych punktów na płaszczyźnie granicznej, tj. B' lub B". Przejście do B' można osiągnąć przez proporcjonalne zwiększenie obu wyjść i utrzymanie *status quo* dla wejścia (wówczas mowa jest o orientacji na wyniki), podczas gdy przejście do B" poprzez zmniejszenie wejścia i utrzymanie stałych wyjść (orientacja na nakłady)³⁴².

³⁴² E. Chodakowska, J. Nazarko (2017), *Environmental DEA method for assessing productivity of European countries*, "Technological and Economic Development of Economy" 23(4): 589–607, <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2016.1272069>.



Rysunek 2.7. Granica efektywności – przypadek dwóch wyjść i pojedynczego wejścia

Źródło: opracowanie własne na podstawie: E. Chodakowska, J. Nazarko, *Environmental DEA...*, op. cit.

Symbole i notacja modeli DEA jest następująca:

- | | | |
|---|---|--|
| DMU_j | - | jednostka decyzyjna j , |
| $j = 1, 2, \dots, j_o, \dots, n$ | - | numery jednostek w analizowanych (DMU), |
| $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}, \dots, x_{jM})$ | - | wektor wejść, |
| $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{js}, \dots, y_{jS})$ | - | wektor wyjść, |
| M | - | liczba wejść, |
| S | - | liczba wyjść, |
| $U_{jr} = (u_{j1r}, u_{j2r}, \dots, u_{jmr}, \dots, u_{jMr})$ | - | wektor wag wejść obiektu j , |
| $V_{js} = (v_{j1s}, v_{j2s}, \dots, v_{jss}, \dots, v_{jSs})$ | - | wektor wag wyjść obiektu j , |
| λ_j | - | wektor nieujemnych wag określający intensywność wykorzystania technologii obiektu j w technologii optymalnej ocenianego obiektu. |

Podstawą pierwszego modelu DEA, nazwanego CCR od pierwszych liter nazwisk twórców metody, jest indywidualne poszukiwanie wag dla poszczególnym nakładów i efektów każdej jednostki, maksymalizujących wartość ilorazu ważonej sumy efektów i nakładów, przy założeniu, że uzyskane wskaźniki nie mogą być większe niż 1³⁴³:

³⁴³ A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes, *Measuring the efficiency...*, op. cit.

$$\begin{aligned} & \max \frac{\sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{j_0s}}{\sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{j_0m}}; & (2.26) \\ & \frac{\sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{js}}{\sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{jm}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n; \\ & v_{j_0s} \geq 0, u_{j_0m} \geq 0. \end{aligned}$$

Transformując model (2.26) do postaci liniowej, można przyjąć orientację na efekty (ang. *output oriented* – CCR-O)³⁴⁴:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{j_0s}, & (2.27) \\ & \sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{j_0m} = 1, \\ & \sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{js} - \sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{jm} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Alternatywne jest założenie orientacji na nakłady (ang. *input oriented* – CCR-I)³⁴⁵:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{j_0m}, & (2.28) \\ & \sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{j_0s} = 1, \\ & \sum_{s=1}^S v_{j_0s} y_{js} - \sum_{m=1}^M u_{j_0m} x_{jm} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Przedstawione równania: (2.27) i (2.28) w literaturze określane są mianem mnożnikowych (ang. *multiplier form*) w celu odróżnienia od nich form dualnych, nazywanych obwiedniowymi (ang. *envelopment form*)³⁴⁶. Wersje dualne, obwiedniowe zadań (2.27) i (2.28) przedstawiają odpowiednio wzory (2.29) – model CCR-I oraz (2.30) – model CCR-O³⁴⁷:

³⁴⁴ J. Zhu (2003), *Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking: Data Envelopment Analysis with Spreadsheets and DEA Excel Solver*, Springer, s. 5.

³⁴⁵ Ibidem, s. 9.

³⁴⁶ R. Ramanathan (2003), *An introduction to Data Envelopment Analysis: a tool for performance measurement*, Sage Publications, New Delhi, s. 59; W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone (2007), *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Second Edition, Springer, s. 43.

³⁴⁷ W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone, *Data Envelopment Analysis...*, op. cit., s. 43,58; W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.) (2011), *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Second Edition, Springer Science & Business Media, s. 9.

$$\min \theta, \quad (2.29)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} \leq \theta x_{j_0m}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} \geq y_{j_0s}, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n;$$

$$\max \phi = 1/\theta, \quad (2.30)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} \leq x_{j_0m}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} \geq \phi y_{j_0s}, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

gdzie:

$\min \theta = \theta^*$, $\max \phi = \phi^*$ – techniczna efektywność przyjmująca wartość z zakresu $[0,1]$.

Jednostki decyzyjne, dla których oszacowane $\theta^* < 1$ ($\phi^* > 1$), są nieefektywne, natomiast te, dla których $\theta^* = 1$ ($\phi^* = 1$), są jednostkami granicznymi, czyli efektywnymi. Przedstawione modele nie biorą pod uwagę niezerowych luzów (ang. *slacks*), czyli zmiennych swobodnych, które mogą się pojawić w wyniku rozwiązania zadań programowania liniowego. W przypadku modelu zapisanego równaniem (2.29) ich wartość można określić jako³⁴⁸:

$$s_m^- = \theta^* x_{j_0m} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm}, \quad m = 1, \dots, M; \quad (2.31)$$

$$s_s^+ = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - y_{j_0s}, \quad s = 1, \dots, S.$$

Luzy nakładów – s_m^- i rezultatów – s_s^+ to inaczej nadwyżki nakładów i niedobory rezultatów technologii empirycznej określonego obiektu w stosunku do technologii optymalnej. Zaproponowanym w literaturze rozwiązaniem problemu jest odwołanie się do formuły programowania liniowego maksymalizującej luzy, co dla modelu CCR-I (2.27) będzie miało formę³⁴⁹:

³⁴⁸ J. Zhu, *Quantitative Models...*, op. cit., s. 7.

³⁴⁹ M. Wen (2015), *Uncertain Data Envelopment Analysis*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, s. 47–50, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43802-2>; W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.), *Handbook on Data...*, op. cit., s. 8–14; G. Kozuń-Cieślak (2011), *Wykorzystanie metody DEA do oceny efektywności w usługach sektora publicznego*, „Wiadomości Statystyczne” 3: 14–42, http://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5982/7/4/1/wiadomosci_statystyczne_2011.zip [2.11.2018].

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_s^S s_s^+, & (2.32) \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} + s_m^- = \theta^* x_{j_0 m}, \quad m = 1, \dots, M, \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - s_r^+ = y_{j_0 s}, \quad s = 1, \dots, S, \\
& \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
& s_m^- \geq 0, \quad s_s^+ \geq 0.
\end{aligned}$$

Rozwiązanie (2.32) jest równoznaczne z rozwiązaniem następującego, częścię spotykanego w literaturze, zadania w dwóch etapach³⁵⁰:

$$\begin{aligned}
& \min \theta - \varepsilon (\sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_s^S s_s^+), & (2.33) \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} + s_m^- = \theta x_{j_0 m}, \quad m = 1, \dots, M, \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - s_r^+ = y_{j_0 s}, \quad s = 1, \dots, S, \\
& \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
& s_m^- \geq 0, \quad s_s^+ \geq 0,
\end{aligned}$$

gdzie:

ε – niearchimedesowy element, $\varepsilon > 0$ i jednocześnie mniejszy niż jakakolwiek dodatnia liczba rzeczywista³⁵¹.

Analogiczny dodatek, uwzględniający luzy dla modelu zorientowanego na wyjścia CCR-O (2.30), ma następującą postać³⁵²:

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_s^S s_s^+, & (2.34) \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} + s_m^- = x_{j_0 m}, \quad m = 1, \dots, M, \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - s_r^+ = \phi^* y_{j_0 s}, \quad s = 1, \dots, S, \\
& \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
& s_m^- \geq 0, \quad s_s^+ \geq 0.
\end{aligned}$$

³⁵⁰ W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.), *Handbook on Data...*, op. cit., s. 13; J. Zhu, *Quantitative Models...*, op. cit. s. 13.

³⁵¹ G. Kozuń-Cieślak, *Wykorzystanie metody DEA...*, op. cit.

³⁵² W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.), *Handbook on Data...*, op. cit. s. 13; J. Zhu, *Quantitative Models...*, op. cit., s. 13.

Łącząca zadania (2.30) i (2.34) notacja modelu CCR-O z luzami ma formę³⁵³:

$$\begin{aligned} \max \phi + \varepsilon(\sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_{s=1}^S s_s^+), & \quad (2.35) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} + s_m^- = x_{j_0m}, m = 1, \dots, M, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - s_s^+ = \phi y_{j_0s}, s = 1, \dots, S, \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \\ s_m^- \geq 0, s_s^+ \geq 0. \end{aligned}$$

Rozpatrywanie luzów modeli DEA prowadzi do następującej definicji efektywności. Jednostka DMU jest w pełni efektywna (100%) wtedy i tylko wtedy, gdy $\theta^* = 1$ ($\varphi^*=1$) i wszystkie luzy s_m^- i s_s^+ są równe 0³⁵⁴. W wypadku gdy $\theta^* = 1$ ($\varphi^*=1$) oraz $s_m^- \neq 0$ i/lub $s_s^+ \neq 0$ dla pewnych m oraz s w niektórych alternatywnych optima, jednostkę można określić jako słabo efektywną (ang. *weak efficient*)³⁵⁵.

Przedstawiony podstawowy model CCR w ciągu 40 lat od powstania podlegał wielu modyfikacjom i uzupełnieniom³⁵⁶, doczekał się też ogromnej liczby zastosowań. J.S. Liu i in.³⁵⁷, dokonując przeglądu literatury, wyodrębnili pięć obszarów rozwoju metody: dwuetapową ocenę kontekstu, rozszerzenie modeli, przetwarzanie danych specjalnych, analizę wewnętrznej struktury, pomiar efektywności środowiskowej. W aspekcie tylko modeli DEA B. Guzik³⁵⁸ wymienia następujące podstawowe rozszerzenia modelu CCR (zwanym również CRS – ang. *constant returns to scale*):

1. BCC (VRS – *variable return to scale*) – model dla zmiennych korzyści skali – R.D. Banker, A. Charnes i W.W. Cooper (1984)³⁵⁹

W modelach BCC wprowadzone dodatkowe ograniczenie zapewnia, że jednostki referencyjne działają w podobnej skali jak jednostka oceniana. Tym samym otrzymywany wynik jest zawsze nie mniejszy niż w modelu CCR. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą modeli CCR i BCC pozwala na dekompozycję efektywności technicznej i uzyskanie informacji o ewentualnym działaniu w nieoptymalnym obszarze korzyści skali.

³⁵³ W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.), *Handbook on Data...*, op. cit., s. 8–14.

³⁵⁴ W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone, *Data Envelopment Analysis...*, op. cit., s. 58.

³⁵⁵ W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu (red.), *Handbook on Data...*, op. cit., s. 10.

³⁵⁶ E. Chodakowska, *Ocena...*, op. cit. s. 45.

³⁵⁷ J.S. Liu, L.Y.Y. Lu, W.-M. Lu, B.J.Y. Lin (2013), *Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey*, "Omega" 41(1): 3–15, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.006>.

³⁵⁸ B. Guzik (2009), *Podstawowe modele DEA w badaniu efektywności gospodarczej i społecznej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.

³⁵⁹ R.D. Banker, A. Charnes, W.W. Cooper (1984), *Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis*, "Management Science" 30(9): 1078–1092, <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>.

2. SBM (*slack-based model*) – model oparty na luzach – A. Charnes, W.W. Cooper, B. Golany, L. Seiford i J. Stutz (1985)³⁶⁰
Modele SBM uchylają założenie o proporcjonalnej (czyli radialnej) redukcji nakładów, jednocześnie otrzymywany wynik efektywności pomniejszają o średni udział luzów nakładów i wyników.
3. CEM (*cross-efficiency model*) – model efektywności krzyżowej – T.R. Sexton, R.H. Silkman i A.J. Hogan (1986)³⁶¹
W modelach CEM efektywność każdej jednostki jest zbiorem ocen uzyskiwanych za pomocą optymalnych schematów wag innych obiektów. Otrzymywany wynik może być traktowany jako autoewaluacja albo ocena z perspektywy innych jednostek.
4. CEP (*cross-efficiency profiling*) – model sprofilowanej efektywności krzyżowej – J. Doyle i R. Green (1994)³⁶², C. Tofallis (1996)³⁶³
Rozszerzenie modeli CEM zaproponowane zostało w celu zwiększenia mocy klasyfikacyjnej DEA. Podobnie jak w CEM jednostka jest oceniana za pomocą wag innych obiektów. Jednakże w rozwiązaniu zaproponowanym przez J. Doyle’a i R. Greena (1994) optymalne wagi są identyfikowane tak, aby maksymalizować efektywność jednostki i jednocześnie minimalizować efektywność pozostałych, zaś C. Tofallis (1996) postulował dodatkowo, aby osobno oceniać poszczególne wejścia w relacji do wybranych wyników.
5. SE-DEA (*super-efficiency DEA*) – model nadefektywności/superefektywności – P. Andersen i N.C. Petersen (1993)³⁶⁴
Modele SE umożliwiają klasyfikację obiektów efektywnych, nie ograniczając maksymalnego wyniku do 1. Ze względu na wykorzystanie w hybrydowym modelu priorytetyzacji technologii dokładnie zostały one omówione poniżej.

³⁶⁰ A. Charnes, W.W. Cooper, B. Golany, L. Seiford, J. Stutz (1985), *Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions*, "Journal of Econometrics" 30(1-2): 91-107, [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(85\)90133-2](https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90133-2).

³⁶¹ T.R. Sexton, R.H. Silkman, A.J. Hogan (1986), *Data Envelopment Analysis: Critique and Extensions*, w: R.H. Silkman (red.) *Measuring Efficiency: An Assessment of Data Envelopment Analysis*, Jossey-Bass, <https://doi.org/10.1002/ev.1441>.

³⁶² J. Doyle, R. Green (1994), *Efficiency and Cross-efficiency in DEA: Derivations, Meanings and Uses*, "Journal of the Operational Research Society" 45(5): 567-578, <https://doi.org/10.1057/jors.1994.84>.

³⁶³ C. Tofallis (1996), *Improving discernment in DEA using profiling*, "Omega" 24(3): 361-364, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00065-8).

³⁶⁴ P. Andersen, N.C. Petersen (1993), *A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis*, "Management Science" 39(10): 1261-1264, <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>.

6. NR-DEA (*non-radial* DEA) – nieradialna DEA – E. Thanassoulis i R.G. Dyson (1992)³⁶⁵, J. Zhu (1996)³⁶⁶

W modelach nieradialnych dopuszcza się istnienie substytucji w obrębie nakładów lub rezultatów i pozwala ocenić jej wielkość. Liczona jest efektywność cząstkowa.

7. ML-DEA (*multi-level* DEA: *dynamic* DEA, *hierarchic* DEA, *network* DEA) – wielopoziomowa DEA: dynamiczna DEA, hierarchiczna DEA, sieciowa DEA – W.D. Cook, D. Chai, J. Doyle i R. Green (1998)³⁶⁷, J. Nemoto i M. Goto (1999)³⁶⁸

Modele ML uwzględniają strukturę wewnętrzną obiektu (obszary i procesy), a także połączenia między różnymi aktywnościami, przez co dają możliwość uzyskania informacji zarówno o efektywności poszczególnych obszarów w ramach danej jednostki, jak i jej efektywności ogólnej.

8. HRS (*hybrid return-to-scale*) – model z hybrydowymi korzyściami skali – V.V. Podinovski (2004)³⁶⁹

Modele HRS łączą założenia CRS w odniesieniu do wybranych wejść i wyjść, przy zachowaniu założeń BBC w odniesieniu do pozostałych wskaźników. Eliminują konieczność założenia pełnej proporcjonalności między wszystkimi wejściami i wyjściami przez dopuszczenie istnienia tylko podzbioru wyjść proporcjonalnych do podzbioru wejść.

9. T-DEA (*transconcave* DEA) – model z transformacją nakładów lub/i efektów – T. Post (2001)³⁷⁰

Modele zamieniają standardowe założenie modeli DEA co do wypukłej granicy efektywności na bardziej ogólną: granicę transformowalną do wypukłej. Rozszerzają zastosowanie, umożliwiając uwzględnienie na przykład dysekononii skali.

Z perspektywy wykorzystania metody DEA do analizy technologii szczególnie zasadne wydaje się stosowanie modeli nadefektywności (SE-DE). Modele te umożliwiają klasyfikację obiektów w pełni efektywnych. W wypadku analizy

³⁶⁵ E. Thanassoulis, R.G. Dyson (1992), *Estimating Preferred Target Input-Output Levels Using Data Envelopment Analysis*, "European Journal of Operational Research" 56(1): 80-97, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90294-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90294-J).

³⁶⁶ J. Zhu (1996), *Data Envelopment Analysis with Preference Structure*, "Journal of the Operational Research Society" 47(1): 136-150, <https://doi.org/10.1057/jors.1996.12>.

³⁶⁷ W.D. Cook, D. Chai, J. Doyle, R. Green (1998), *Hierarchies and Groups in DEA*, "Journal of Productivity Analysis" 10(2): 177-198, <https://doi.org/10.1023/A:1018625424184>.

³⁶⁸ J. Nemoto, M. Goto (1999), *Dynamic data envelopment analysis: modeling intertemporal behavior of a firm in the presence of productive inefficiencies*, "Economics Letters" 64(1): 51-56, [https://doi.org/10.1016/S0165-1765\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0165-1765(99)00070-1).

³⁶⁹ V.V. Podinovski (2004), *Bridging the gap between the constant and variable returns-to-scale models: selective proportionality in data envelopment analysis*, "Journal of the Operational Research Society" 55(3): 265-276, <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601691>.

³⁷⁰ T. Post (2001), *Transconcave data envelopment analysis*, "European Journal of Operational Research" 132(2): 374-389, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00158-2).

nielicznego zbioru jednostek, lecz pod względem wielu kryteriów – co jest typowe w projektach analizy technologii – zbiór jednostek klasyfikowanych jako w pełni efektywne jest bardzo liczny. Rozwiązanie problemu zaproponowali P. Andersen i N.C. Petersen³⁷¹, choć sama idea była znana wcześniej³⁷² i wskazana w pracy R.D. Bankera i J.L. Gilforda³⁷³ czy A. Charnesa i in.³⁷⁴ Model superefektywności zorientowany na wejścia przy założeniu stałych efektów skali (SE-CCR-I) można zapisać jako:

$$\min \theta - \varepsilon (\sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_{s=1}^S s_s^+), \quad (2.36)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jm} + s_m^- = \theta x_{j_0 m}, \quad m = 1, \dots, M \text{ oraz } j \neq j_0,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{js} - s_s^+ = y_{j_0 s}, \quad s = 1, \dots, S \text{ oraz } j \neq j_0,$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$s_m^- \geq 0, \quad s_s^+ \geq 0.$$

W modelu nadefektywności wyklucza się z ograniczeń optymalizacji analizowany obiekt, a konsekwencją jest brak ograniczenia efektywności od góry wartością 1. Różnicę w formułowanej granicy w modelu DEA i SE-DEA ilustruje rysunek 2.8. Oszacowana efektywność jednostki B w modelu SE-DEA liczona w odniesieniu do B' tj. $\left(\frac{\overline{OB'}}{\overline{OB}}\right)$ będzie większa od 1.

W kontekście oceny technologii warto wspomnieć też o modelach TFDEA (ang. *Technology Forecasting – DEA*), stosujących wskaźnik tempa zmian technologicznych – RoC (ang. *Rate of Change*) i ich wariantów, które zaproponowali T.R. Anderson i in. (2001)³⁷⁵ oraz O.L. Inman (2004)³⁷⁶.

³⁷¹ P. Andersen, N.C. Petersen, *A Procedure for Ranking...*, op. cit.

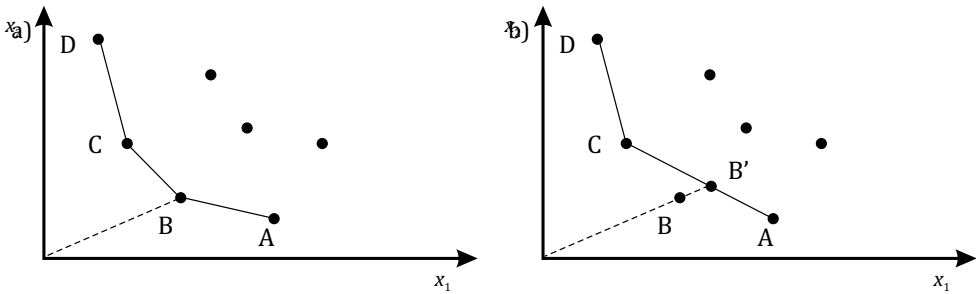
³⁷² Y. Chen (2004), *Ranking efficient units in DEA*, "Omega" 32(3): 213–219, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2003.11.001>; B. Guzik, *Podstawowe modele DEA...*, op. cit.

³⁷³ R.D. Banker, J.L. Gilford (1988), *A relative efficiency model for the evaluation of public health nurse productivity*, Pittsburgh: Mimeo, Carnegie Mellon University.

³⁷⁴ A. Charnes, S. Haag, P. Jaska, J.H. Semple (1992), *Sensitivity of Efficiency Classifications in the Additive Model of Data Envelopment Analysis*, "International Journal of Systems Science" 23(5): 789–798.

³⁷⁵ T.R. Anderson, K. Hollingsworth, L. Inman, *Assessing...*, op. cit.

³⁷⁶ O.L. Inman (2004), *Technology forecasting using data envelopment analysis*, PhD dissertation, Department of Engineering and Technology Management, Portland State University, <https://core.ac.uk/download/pdf/37776964.pdf> [3.11.2018].



Rysunek 2.8. Granica efektywności modelu: a) DEA i b) SE-DEA – przypadek dwóch wejść
 Źródło: opracowanie własne.

Modele DEA, umożliwiając jednoczesną analizę wielu nakładów i wyników, są obecnie stosowane rutynowo we względnej ocenie działania podmiotów i systemów w różnych kontekstach. Ograniczeniem konwencjonalnych modeli DEA jest to, że operują na danych deterministycznych i ostrych, co w powiązaniu z ich dużą wrażliwością na błędy danych uniemożliwia analizę, gdy odnotowywane wartości są nieprecyzyjne lub niepewne. W rzeczywistych problemach dokładna miara wszystkich bądź wybranych czynników wejść i wyjść w wielu przypadkach nie jest możliwa: oceny są przybliżone bądź określane na przykład pojęciami języka naturalnego. Problem ten stanowił impuls do rozwoju modeli DEA uwzględniających niepewność danych. Wśród nich można wymienić modele przybliżone, zaproponowane przez W.W. Coopera, K.S. Parka i J.T. Pastora³⁷⁷, czy zależne od kontekstu modele DEA dla danych przedziałowych, opisane w pracy W.W. Coopera, K.S. Parka i G. Yu³⁷⁸. Najczęściej spotykanym w literaturze rozwiązaniem są modele rozmyte DEA (ang. *fuzzy* DEA – FDEA), o które warto rozszerzyć listę B. Guzika. Bardzo liczną grupę prac dotyczących FDEA otwierają³⁷⁹ prace J.K. Sengupta³⁸⁰, który badał użycie miar rozmytych w modelach DEA w przypadku zestawu danych o niejasnym i nieprecyzyjnym charakterze. Temat

³⁷⁷ W.W. Cooper, K.S. Park, J.T. Pastor (1999), *RAM: a range adjusted measure of inefficiency for use with additive models, and relations to other models and measures in DEA*, "The Journal of Productivity Analysis" 11(1): 5–42, <https://doi.org/10.1023/A:100770130>.

³⁷⁸ W.W. Cooper, K.S. Park, G. Yu (1999), *IDEA and AR-IDEA: Models for dealing with imprecise data in DEA*, "Management Science" 45(4): 597–607, <https://doi.org/10.1287/mnsc.45.4.597>.

³⁷⁹ A. Emrouznejad, M. Tavana (red.) (2014), *Performance Measurement with Fuzzy Data Envelopment Analysis*, "Studies in Fuzziness and Soft Computing" 309, Springer.

³⁸⁰ J.K. Sengupta (1992), *A fuzzy systems approach in data envelopment analysis*, "Computers & Mathematics with Applications" 24(8–9): 259–266, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089812219290203T>; J.K. Sengupta, (1992), *Measuring Efficiency by a Fuzzy Statistical Approach*, "Fuzzy Sets and Systems" 46(1): 73–80, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(92\)90268-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90268-9).

modeli FDEA poruszają między innymi: C. Kao i S.T. Liu³⁸¹, P. Guo i H. Tanaka³⁸², S. Lertworasirikul i in.³⁸³ czy B. Liu i Y.K. Liu³⁸⁴. Stan wiedzy wraz z klasyfikacją rozwiązań *fuzzy* DEA opracowali A. Emrouznejad i M. Tavana³⁸⁵.

Metoda DEA stosowana jest we wszystkich sektorach gospodarki³⁸⁶: edukacji³⁸⁷ (w tym bardzo często szkolnictwa wyższego³⁸⁸), usług finansowych (banków³⁸⁹ i instytucji ubezpieczeniowych³⁹⁰, giełd³⁹¹), ochrony zdrowia (szpi-

³⁸¹ C. Kao, S.T. Liu (2000), *Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis*, "Fuzzy Sets and Systems" 113(3): 427–437, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00137-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00137-7).

³⁸² P. Guo, H. Tanaka (2001), *Fuzzy DEA: A perceptual evaluation method*, "Fuzzy Sets and Systems" 119(1):149–160, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00106-2).

³⁸³ S. Lertworasirikul, S.C. Fang, J.A. Joines, H.L.W. Nuttle (2003), *Fuzzy data envelopment analysis (DEA): A possibility approach*, "Fuzzy Sets and Systems" 139: 379–394, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00484-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00484-0).

³⁸⁴ B. Liu, Y.-K. Lu (2002), *Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models*, "IEEE Transactions on Fuzzy Systems" 10(4): 445–450, <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2002.800692>.

³⁸⁵ A. Emrouznejad, M. Tavana (red.), *Performance Measurement with Fuzzy...*, op. cit.

³⁸⁶ Przytoczone aplikacje wybrano na podstawie reprezentatywności mierzonej liczbą cytowań w bazach WoS, a także subiektywnej oceny wartości danego opracowania.

³⁸⁷ A. Mizala, P. Romaguera, D. Farren (2002), *The technical efficiency of schools in Chile*, "Applied Economics" 34(12): 1533–1552, <https://doi.org/10.1080/00036840110103256>; M.C.A. Silva Portela, E. Thanassoulis (2001), *Decomposing school and school type efficiency*, "European Journal of Operational Research" 132(2): 357–373, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00157-0); R.D. Banker, S. Janakiraman, R. Natarajan (2004), *Analysis of trends in technical and allocative efficiency: An application to Texas public school districts*, "European Journal of Operational Research" 154(2): 477–491, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00183-8); E. Chodakowska (2015), *The Future of Evaluation of Lower Secondary Schools' Management*, "Business, Management and Education" 13(1): 112–125, <https://doi.org/10.3846/bme.2015.256>.

³⁸⁸ J. Nazarko, J. Šaparauskas (2014), *Application of DEA method in efficiency evaluation of public higher education institutions*, "Technological and Economic Development of Economy" 20(1): 25–44, <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.837116>; B. Taylor, G. Harris (2004), *Relative efficiency among South African universities: a data envelopment analysis*, "Higher Education" 47(1): 73–89, <https://doi.org/10.1023/B:HIGH.0000009805.98400.4d>; J. Johnes (2006), *Measuring teaching efficiency in higher education: An application of data envelopment analysis to economics graduates from UK Universities 1993*, "European Journal of Operational Research" 174(1): 443–456, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.044>; K.-H. Leitner, J. Prikoszovits, M. Schaffhauser-Linzatti, R. Stowasser, K. Wagner (2007), *The impact of size and specialisation on universities' department performance: A DEA analysis applied to Austrian universities*, "Higher Education" 53(4): 517–538, <https://doi.org/10.1007/s10734-006-0002-9>; X. Song (2018), *Analysis for Capital Investment Efficiency in Higher Education of Northeast China Based on DEA Model*, "Educational Sciences-Theory & Practice" 18(6): 3202–3208, <https://doi.org/10.12738/estp.2018.6.223>.

³⁸⁹ C.-C. Yang (2014), *An enhanced DEA model for decomposition of technical efficiency in banking*, "Annals of Operations Research" 214(1): 167–185, <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0926-z>.

³⁹⁰ C. Kao, S.-N. Hwang (2008), *Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan*, "European Journal of Operational Research" 185(1): 418–429, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.041>.

³⁹¹ N.C.P. Edirisinghe, X. Zhang (2007), *Generalized DEA model of fundamental analysis and its application to portfolio optimization*, "Journal of Banking & Finance" 31(11): 3311–3335, <https://doi.org/10.1016/j.jbf.2007.08.001>.

tali³⁹² i zakładów opieki zdrowotnej³⁹³), transporcie, spedycji i logistyce³⁹⁴, rolnictwie³⁹⁵, lecz także w sporcie³⁹⁶, turystyce³⁹⁷, instytucjach kultury³⁹⁸, w tym bibliotek³⁹⁹.

Uporządkowanie wiedzy o teorii zbiorów przybliżonych i metodzie DEA tworzy fundament do ich syntezy i przedstawienia założeń hybrydowego modelu. Przeprowadzone studia wskazały na następujące możliwości połączenia cech zbiorów przybliżonych i DEA do priorytetyzacji technologii: (i) koncepcję reduktów, czyli wybranych kombinacji atrybutów zachowujących rozróżnialność obiektów do ograniczenia liczby kryteriów oceny technologii; (ii) przybliżenia zbiorów do modelowania rozbieżności indywidualnych ocen eksperckich; (iii) algorytmy optymalizacji liniowej z metody DEA do obiektywnego określenia wag atrybutów reduktów maksymalizujących wynik oceny dla poszczególnych technologii; (iv) definicję efektywności metody DEA do wyznaczenia końcowej syntetycznej oceny. Szczegółowa koncepcja i sposób konstrukcji hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii zostały opisane w dalszej części monografii.

doi.org/10.1016/j.jbankfin.2007.04.008.

³⁹² R. Ramanathan (2005), *Operations assessment of hospitals in the Sultanate of Oman*, "International Journal of Operations & Production Management" 25(1): 39–54, <https://doi.org/10.1108/01443570510572231>.

³⁹³ B. Hollingsworth, P.J. Dawson, N. Maniadakis (1999), *Efficiency measurement of health care: a review of non-parametric methods and applications*, "Health Care Management Science" 2(3): 161–172, <https://doi.org/10.1023/A:1019087828488>.

³⁹⁴ K.P.B. Cullinane, Wang T.-F. (2006), *The efficiency of European container ports: A cross-sectional data envelopment analysis*, "International Journal of Logistics: Research & Applications" 9(1): 19–31, <https://doi.org/10.1080/13675560500322417>.

³⁹⁵ K. Galanopoulos, S. Aggelopoulos, I. Kamenidou, K. Mattas (2006), *Assessing the effects of managerial and production practices on the efficiency of commercial pig farming*, "Agricultural Systems" 88(25–3): 125–141, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.03.002>.

³⁹⁶ I.M. Garcia-Sánchez (2007), *Efficiency and effectiveness of Spanish football teams: a three-stage-DEA approach*, "Central European Journal of Operations Research" 15(1): 21–45, <https://doi.org/10.1007/s10100-006-0017-4>.

³⁹⁷ C. Yang, W.-M. Lu (2006), *Performance Benchmarking for Taiwan's International Tourist Hotels*, "INFOR" 44(3): 229–245, <https://doi.org/10.1080/03155986.2006.11732750>.

³⁹⁸ F. Marco-Serrano (2006), *Monitoring managerial efficiency in the performing arts: A regional theatres network perspective*, "Annals of Operations Research" 145(1): 167–181, <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0032-9>.

³⁹⁹ G. Reichmann (2004), *Measuring University Library Efficiency using Data Envelopment Analysis*, "Libri" 54: 136–146, <https://doi.org/10.1515/LIBR.2004.136>.

3. Hybrydowy model priorytetyzacji technologii

W części pierwszej rozdziału przedstawiono koncepcję hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii oraz realizujące ją wzory i algorytmy, posługując się przywołanymi w poprzedniej, drugiej części pracy definicjami. Wprowadzone równania i terminy służą przybliżeniu i precyzyjnemu przedstawieniu struktury hybrydowego modelu. Z kolei celem podrozdziału 3.2 było przedstawienie umiejscowienia hybrydowego modelu w procesie priorytetyzacji technologii. Sformułowano rekomendacje i praktyczne wskazówki, przedstawiając jednocześnie ograniczenia wynikające ze specyfiki wykorzystywanych w modelu metod, oraz zaprezentowano projekt kompleksowego procesu priorytetyzacji technologii stosujący hybrydowy model. Głównym celem autorki była odpowiedź na następujące pytanie badawcze: jaki efekt synergiczny wynika z połączenia koncepcji zbiorów przybliżonych i metody DEA?

3.1. Koncepcja i wzory hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii

Hybrydowy model priorytetyzacji technologii bazuje na elementach z teorii zbiorów przybliżonych oraz metodzie DEA. Połączenie to pozwala znieść ograniczenie stosowania DEA do danych, zarówno wejściowych, jak i wyjściowych, ściśle i jednoznacznie określonych. W hybrydowym modelu wykorzystana jest koncepcja zmiennej przybliżonej ξ opracowana przez B. Liu⁴⁰⁰:

$$\xi = ([a, b], [c, d]), \text{ dla } c \leq a < b \leq d. \quad (3.1)$$

Wartość oczekiwaną ξ można określić wzorem⁴⁰¹:

$$E[\xi] = \frac{1}{4}(a + b + c + d). \quad (3.2)$$

Rozważana zmienna przybliżona ξ reprezentuje mierzalną, tożsamościową funkcję $\xi(\lambda) = \lambda$ z przestrzeni przybliżonej $(\Lambda, \Delta, A, \pi)$ do zbioru liczb rzeczywistych, gdzie: $\Lambda = \{\lambda: c \leq \lambda \leq d\}$, $\Delta = \{\lambda: a \leq \lambda \leq b\}$, A – σ -algebra Borela

⁴⁰⁰ B. Liu (2004), *Uncertain Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundation*, Springer, Berlin, s. 142.

⁴⁰¹ R.K. Shiraz, V. Charles, L. Jalalzadeh (2014), *Fuzzy rough DEA model: A possibility and expected value approaches*, "Expert Systems with Applications" 41(2): 434–444, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.069>; B. Liu, *Uncertain Theory...*, op. cit., s. 142.

nad ciałem Λ , π – miara Lebesgue’a⁴⁰². Zmiennej ξ można określić dolne – $\underline{\xi}$ i górne – $\bar{\xi}$ przybliżenie odpowiednio⁴⁰³:

$$\underline{\xi} = \{\xi(\lambda) : \lambda \in \Delta\}, \quad (3.3)$$

$$\bar{\xi} = \{\xi(\lambda) : \lambda \in \Lambda\}. \quad (3.4)$$

Można zauważyć, że z relacji $\Delta \subset \Lambda$ wynika prawdziwość również: $\underline{\xi} \subset \bar{\xi}$.

Formułowanie zmiennej przybliżonej możliwe jest za pomocą opracowanej również przez B. Liu⁴⁰⁴ koncepcji zaufania – Tr (ang. *Trust*).

Górne i dolne zaufanie zdarzenia K definiowane jest odpowiednio⁴⁰⁵:

$$Tr\bar{\xi}(K) = \frac{\pi(K)}{\pi(\Lambda)}, \quad (3.5)$$

$$Tr\underline{\xi}(K) = \frac{\pi(K \cap \Delta)}{\pi(\Delta)}. \quad (3.6)$$

Zaufanie $Tr(K)$ jest ich średnią:

$$Tr(K) = \frac{1}{2} (Tr\bar{\xi}(K) + Tr\underline{\xi}(K)). \quad (3.7)$$

Miara zaufania spełnia następujące warunki⁴⁰⁶:

$$Tr(\Lambda) = 1, \quad (3.8)$$

$$Tr(\emptyset) = 0. \quad (3.9)$$

Formułę określającą wartości Tr dla zmiennej przybliżonej $\xi = ([a, b], [c, d])$ oraz $c \leq a < b \leq d$ można zapisać wzorami⁴⁰⁷:

⁴⁰² R.K. Shiraz, V. Charles, L. Jalalzadeh, *Fuzzy rough DEA...*, op. cit.

⁴⁰³ J. Xu, B. Li, D. Wu, *Rough data envelopment analysis...*, op. cit.; B. Liu, *Uncertain Theory...*, op. cit., s. 142.

⁴⁰⁴ B. Liu, *Uncertain Theory...*, op. cit. s. 143.

⁴⁰⁵ J. Xu, B. Li, D. Wu, *Rough data envelopment analysis...*, op. cit.; B. Liu, *Uncertain Theory...*, op. cit., s. 139.

⁴⁰⁶ B. Liu, *Uncertain Theory...*, op. cit., s. 139.

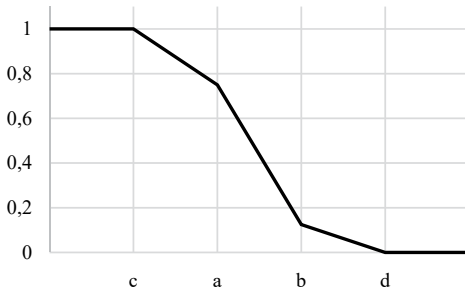
⁴⁰⁷ R.K. Shiraz, H. Fukuyama, M. Tavana, D. Di Caprio (2016), *An integrated data envelopment analysis and free disposal hull framework for cost-efficiency measurement using rough sets*, "Applied Soft Computing" 46: 204–219, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.043>.

$$Tr\{\xi \geq r\} = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } d \leq r \\ \frac{d-r}{2(d-c)}, & \text{jeżeli } b \leq r \leq d \\ \frac{1}{2} \left(\frac{d-r}{d-c} + \frac{b-r}{b-a} \right), & \text{jeżeli } a \leq r \leq b, \\ \frac{1}{2} \left(\frac{d-r}{d-c} + 1 \right), & \text{jeżeli } c \leq r \leq a \\ 1, & \text{jeżeli } r \leq c \end{cases} \quad (3.10)$$

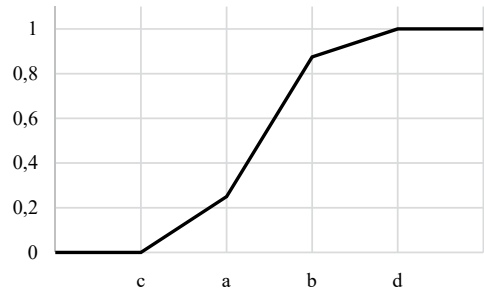
$$Tr\{\xi \leq r\} = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli } r \leq c \\ \frac{r-c}{2(d-c)}, & \text{jeżeli } c \leq r \leq a \\ \frac{1}{2} \left(\frac{r-c}{d-c} + \frac{r-a}{b-a} \right), & \text{jeżeli } a \leq r \leq b, \\ \frac{1}{2} \left(\frac{r-c}{d-c} + 1 \right), & \text{jeżeli } b \leq r \leq d \\ 1, & \text{jeżeli } d \leq r \end{cases} \quad (3.11)$$

Funkcję Tr dla zmiennej $\xi = ([a, b], [c, d])$ i $c \leq a < b \leq d$ przedstawiono na wykresie na rysunku 3.1.

a) $Tr\{\xi \geq r\}$



b) $Tr\{\xi \leq r\}$



Rysunek 3.1. Zaufanie Tr dla zmiennej $\xi = ([a, b], [c, d])$ oraz $c \leq a < b \leq d$: a) $Tr\{\xi \geq r\}$, b) $Tr\{\xi \leq r\}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie: R.K. Shiraz, V. Charles, L. Jalalzadeh (2014), *Fuzzy rough DEA model: A possibility and expected value approaches*, "Expert Systems with Applications" 41(2): 434-444, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.069>.

Ponadto dla zmiennej ξ i $\alpha \in (0,1]$ możliwe jest określenie α -optymistycznej (górnjej granicy) i α -pesymistycznej (dolnej granicy)⁴⁰⁸:

$$\xi_{sup}(\alpha) = \sup\{r: Tr\{\xi \geq r\} \geq \alpha\}, \quad (3.12)$$

$$\xi_{inf}(\alpha) = \inf\{r: Tr\{\xi \leq r\} \geq \alpha\}. \quad (3.13)$$

Korzystając z zależności przedstawionych wzorami (3.10–3.13) dla zmiennej przybliżonej $\xi = ([a, b], [c, d])$ oraz $c \leq a < b \leq d$, wartość α -optymistyczną można zapisać jako⁴⁰⁹:

$$\xi_{sup}(\alpha) = \begin{cases} (1 - 2\alpha)d + 2\alpha c, & \text{jeżeli } 0 \leq \alpha \leq \frac{d-b}{2(d-c)} \\ 2(1 - \alpha)d + (2\alpha - 1)c, & \text{jeżeli } \frac{2d-a-c}{2(d-c)} \leq \alpha \leq 1. \\ \frac{d(b-a)+b(d-c)-2\alpha(b-a)(d-c)}{(b-a)+(d-c)} & \text{w innym wypadku} \end{cases} \quad (3.14)$$

Podobnie można zapisać wartość α -pesymistyczną:

$$\xi_{inf}(\alpha) = \begin{cases} (1 - 2\alpha)c + 2\alpha d, & \text{jeżeli } 0 \leq \alpha \leq \frac{a-c}{2(d-c)} \\ 2(1 - \alpha)c + (2\alpha - 1)d, & \text{jeżeli } \frac{b+d-2c}{2(d-c)} \leq \alpha \leq 1. \\ \frac{c(b-a)+a(d-c)-2\alpha(b-a)(d-c)}{(b-a)+(d-c)} & \text{w innym wypadku} \end{cases} \quad (3.15)$$

W sytuacji, gdy zmienna przybliżona ξ jest liczbą z przedziału $[a,b]$, wzory na α -optymistyczną i α -pesymistyczną wartość redukują się odpowiednio do:

$$\xi_{sup}(\alpha) = \alpha a + (1 - \alpha)b, \quad (3.16)$$

$$\xi_{inf}(\alpha) = (1 - \alpha)a + \alpha b. \quad (3.17)$$

Wyprowadzone wielkości mają następujące charakterystyki⁴¹⁰:

1. $Tr\{\xi \geq \xi_{sup}(\alpha)\} \geq \alpha$ oraz $Tr\{\xi \leq \xi_{inf}(\alpha)\} \geq \alpha$;
2. $\xi_{inf}(\alpha)$ jest rosnącą i ciągłą lewostronnie funkcją α ;
3. $\xi_{sup}(\alpha)$ jest malejąca i ciągłą lewostronnie funkcją α ;
4. $\xi_{inf}(\alpha) = \xi_{sup}(1 - \alpha)$ oraz $\xi_{sup}(\alpha) = \xi_{inf}(1 - \alpha)$ dla $0 < \alpha \leq 1$;
5. Jeżeli $0 < \alpha \leq 0,5$, to $\xi_{inf}(\alpha) \leq \xi_{sup}(\alpha)$;
6. Jeżeli $0,5 < \alpha \leq 1$, to $\xi_{inf}(\alpha) \geq \xi_{sup}(\alpha)$.

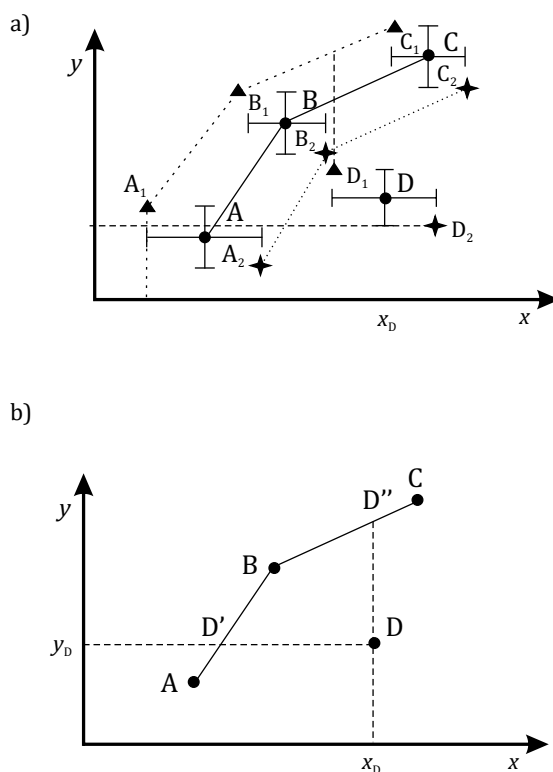
⁴⁰⁸ R.K. Shiraz, V. Charles, L. Jalalzadeh, *Fuzzy rough DEA...*, op. cit.

⁴⁰⁹ G. Tohidi, P. Valizadeh (2011), *A Non-Radial Rough DEA Model*, "International Journal of Mathematical Modelling & Computation" 1(4): 257-261.

⁴¹⁰ J. Xu, B. Li, D. Wu, *Rough data envelopment analysis...*, op. cit.

Konsekwencją przedstawionych zależności jest możliwość przekształcenia zmiennej przybliżonej w przedział: $[\xi_{sup}(\alpha), \xi_{inf}(\alpha)]$ dla $0,5 \leq \alpha \leq 1$ oraz $[\xi_{inf}(\alpha), \xi_{sup}(\alpha)]$ dla $0 < \alpha \leq 0,5$.

Implikacją wykorzystania koncepcji zmiennej przybliżonej w modelu DEA będzie rozważanie dwóch wariantów granicy efektywności – optymistycznej i pesymistycznej, sformułowanych dla dolnych i górnych granic przedziałów. Różnicę między tradycyjnym modelem DEA a modelem DEA dla zmiennych przybliżonych ilustruje rysunek 3.2.



Rysunek 3.2. Koncepcja granicy efektywności: a) BCC DEA i b) BCC DEA dla zmiennych przybliżonych

Źródło: opracowanie własne na podstawie: W. Mu, A. Kanellopoulos, C.E. van Middelaar, D. Stilmant, J.M. Bloemhof (2018), *Assessing the impact of uncertainty on benchmarking the ecoefficiency of dairy farming using fuzzy data envelopment analysis*, "Journal of Cleaner Production" 189: 709–717, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.091>.

Na rysunku 3.2 została przedstawiona granica efektywności w przypadku jednego wejścia – x i jednego wyjścia – y. W obu modelach BCC (modele DEA uwzględniające zmienne korzyści skali) tworzą ją jednostki oznaczone literami

A, B i C. Nieefektywna jest jednostka D. Jej efektywność w przypadku klasycznego modelu BCC można wyznaczyć jako iloraz odległości $\frac{y_D D'}{y_D D}$ (przyjmując orientację na nakłady) lub $\frac{x_D D}{x_D D''}$ (przy założeniu orientacji na efekty). W przypadku rozważania zmiennych przybliżonych, wyrażonych przedziałami, z punktu widzenia jednostki D można sformułować granicę optymistyczną na podstawie dolnych wartości wyników i górnych wartości nakładów jednostek granicznych (tj. A_2, B_2 i C_2) i odnosić do niej górny zakres wyniku i dolny nakład jednostki – D_1 – otrzymując najlepszy wynik (najmniejszą wartość ilorazu odległości). Podobnie można sformułować granicę pesymistyczną dla jednostki D, którą tworzą najlepsze wyniki osiągnięte przy najniższych nakładach jednostek referencyjnych (tj. A_1, B_1 i C_1), i odnosić do niej najgorsze wyniki osiągnięte przy najwyższych kosztach – D_2 .

Zadanie programowania liniowego przybliżonego modelu DEA, wykorzystującego koncepcję wartości optymistycznych i pesymistycznych, można zapisać równaniami (3.18–3.19):

$$\min \theta^{sup(\alpha)}, \tag{3.18}$$

$$\sum_{j=1, j \neq j_0}^n \lambda_j x_{jm}^{sup(\alpha)} + \lambda_{j_0} x_{j_0 m}^{inf(\alpha)} \leq \theta^{sup(\alpha)} x_{j_0 m}^{inf(\alpha)}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{j=1, j \neq j_0}^n \lambda_j y_{js}^{inf(\alpha)} + \lambda_{j_0} y_{j_0 s}^{sup(\alpha)} \geq y_{j_0 s}^{sup(\alpha)}, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n;$$

$$\min \theta^{inf(\alpha)}, \tag{3.19}$$

$$\sum_{j=1, j \neq j_0}^n \lambda_j x_{jm}^{inf(\alpha)} + \lambda_{j_0} x_{j_0 m}^{sup(\alpha)} \leq \theta^{inf(\alpha)} x_{j_0 m}^{sup(\alpha)}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{j=1, j \neq j_0}^n \lambda_j y_{js}^{sup(\alpha)} + \lambda_{j_0} y_{j_0 s}^{inf(\alpha)} \geq y_{j_0 s}^{inf(\alpha)}, \quad s = 1, \dots, S,$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n,$$

gdzie:

$[x_{jm}^{sup(\alpha)}, x_{jm}^{inf(\alpha)}], [y_{js}^{sup(\alpha)}, y_{js}^{inf(\alpha)}]$ – przedział otrzymany dla zmiennej przybliżonej: $([x_{mj}^a, x_{mj}^b], [x_{mj}^c, x_{mj}^d])$ i $([y_{sj}^a, y_{sj}^b], [y_{sj}^c, y_{sj}^d])$ dla $0,5 \leq \alpha \leq 1$;

M – liczba wejść;

S – liczba wyjść;

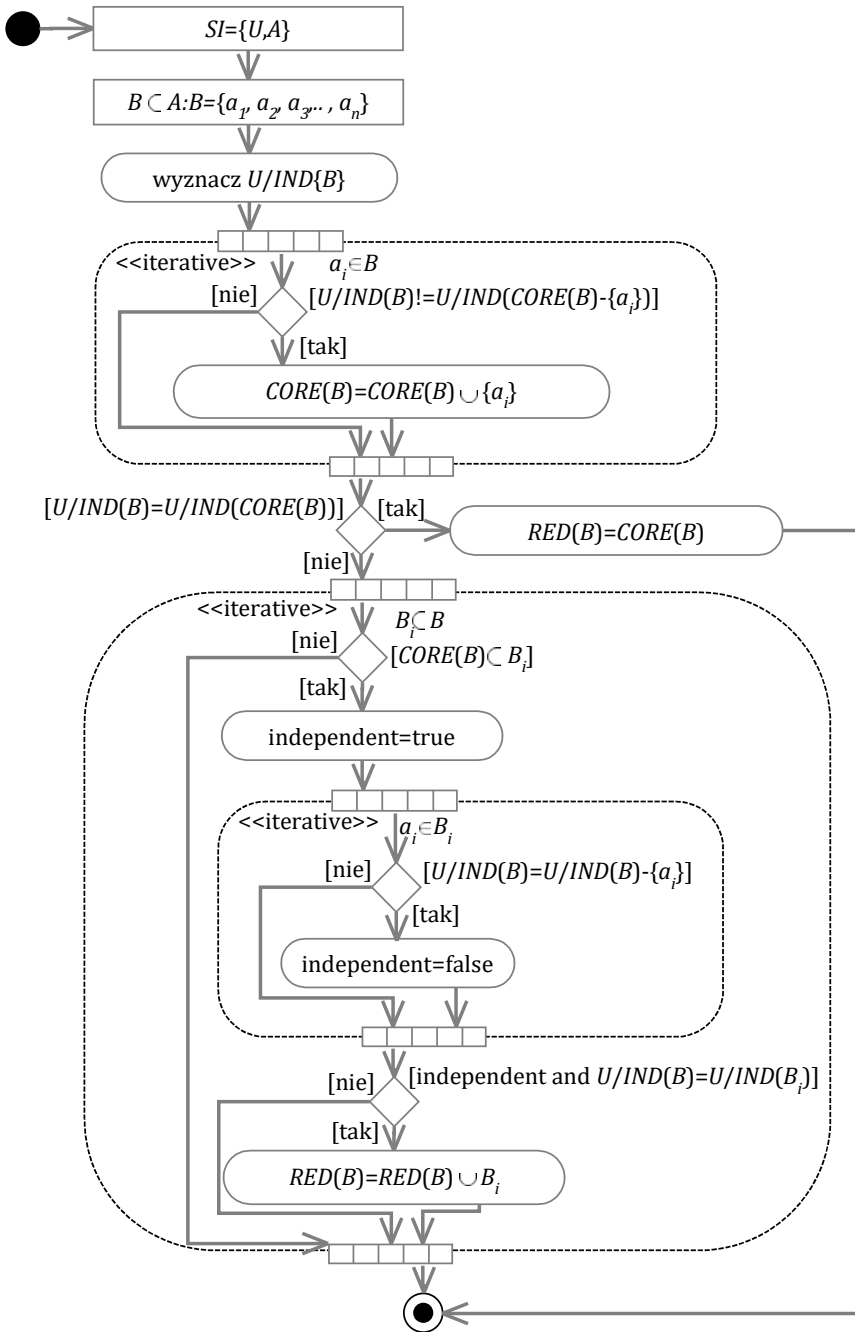
n – liczba jednostek.

Rezultatem zastosowania modelu jest zakres wskaźników efektywności dla przyjętego poziomu α : $[\theta^{sup(\alpha)}, \theta^{inf(\alpha)}]$ ⁴¹¹. W celu uzyskania dolnej wartości efektywności obiektu j_0 zestawia się jego najwyższe nakłady $X_{j_0}^{inf(\alpha)}$ oraz najniższe wyniki $Y_{j_0}^{sup(\alpha)}$ z najniższymi nakładami $X_j^{sup(\alpha)}$ oraz najwyższymi wynikami $Y_j^{inf(\alpha)}$ pozostałych jednostek. Analogicznie górne oszacowanie dla obiektu j_0 otrzymuje się poprzez odniesienie najniższych nakładów $X_{j_0}^{sup(\alpha)}$ oraz najwyższych wyników $Y_{j_0}^{inf(\alpha)}$ do najwyższych nakładów $X_j^{inf(\alpha)}$ oraz najniższych wyników $Y_j^{sup(\alpha)}$ pozostałych analizowanych jednostek. Tym samym, porównując najlepsze oszacowania danej technologii z najgorszymi innych, otrzymuje się optymistyczną ocenę, zaś zestawiając najgorsze opinie z najlepszymi uzyskanymi dla pozostałych technologii, uzyskuje się pesymistyczną ocenę. Wyznaczony zakres wskaźników efektywności jest wyrazem liczby możliwych rozwiązań dotyczących funkcjonalności i potencjału technologii. Szerokość otrzymanego zakresu jest pośrednio determinowana przez poziom α , określający pesymistyczne i optymistyczne wartości kryteriów poszczególnych technologii.

W hybrydowym modelu, oprócz wykorzystania koncepcji zmiennej przybliżonej do formalizacji nieostrych pojęć, proponuje się dodatkowo wykorzystanie metody zbiorów przybliżonych do redukcji kryteriów. Inaczej mówiąc, zastąpienie oryginalnego zbioru kryteriów wybranym reduktem, czyli niezależnym zbiorem atrybutów zachowującym rozróżnialność obiektów.

Ideę wyznaczania jądra i reduktów na podstawie przywołanej w rozdziale 2.1 definicji ilustruje algorytm przedstawiony na rysunku 3.3.

⁴¹¹ J. Xu, B. Li, D. Wu, *Rough data envelopment analysis...*, op. cit.



Rysunek 3.3. Algorytm wyznaczania reduktów

Źródło: opracowanie własne.

Algorytm przedstawiony na rysunku 3.3 rozpoczyna się od wyznaczenia jądra. W tym celu identyfikowane są klasy abstrakcji nierozróżnialności $U/IND(B)$, gdzie B to zbiór wszystkich rozważanych atrybutów. Następnie kolejno wyznaczane są klasy abstrakcji z pominięciem i -tego atrybutu $U/IND(B-\{a_i\})$ i sprawdzane jest, czy a_i jest atrybutem niezbędnym, tzn. czy $U/IND(B)=U/IND(B-\{a_i\})$. Jeżeli atrybut a_i jest niezbędny, oznacza to, że jest atrybutem jądra $CORE(B)$. Wyznaczenie reduktów obejmuje najpierw sprawdzenie, czy jądro nie jest jedynym reduktem, tzn. czy: $U/IND(B)=U/IND(CORE(B))$. W wypadku niespełnienia tego warunku badane są kolejne podzbiory atrybutów $B_i \subseteq B$. Jeżeli podzbiór B_i jest niezależny i prawdziwa jest relacja $U/IND(B)=U/IND(B_i)$, wówczas B_i jest reduktem⁴¹².

Punktem wyjścia do wyznaczania reduktów może być też podstawowa konstrukcja w teorii zbiorów przybliżonych – macierz rozróżnialności (ang. *(in)discernibility matrix*). Macierz rozróżnialności jest tablicą kwadratową o rozmiarze n równym liczbie obiektów w tablicy decyzyjnej⁴¹³. Zawiera w i -tym wierszu i j -tej kolumnie zbiór atrybutów, którymi różnią się obiekty i oraz j ⁴¹⁴. Macierz rozróżnialności $M(SI)$ systemu informacyjnego definiowana jest następująco⁴¹⁵:

$$M(SI) = [c_{ij}]_{n \times n}, \quad (3.20)$$

gdzie:

$$c_{ij} = \{a \in A : a(x_i) \neq a(x_j), \text{ dla } i, j = 1, 2, \dots, n\}.$$

Macierz ta jest symetryczna względem przekątnej, a na przekątnej są zbiory puste⁴¹⁶. Algorytm wyznaczania macierzy zilustrowano na rysunku 3.4.

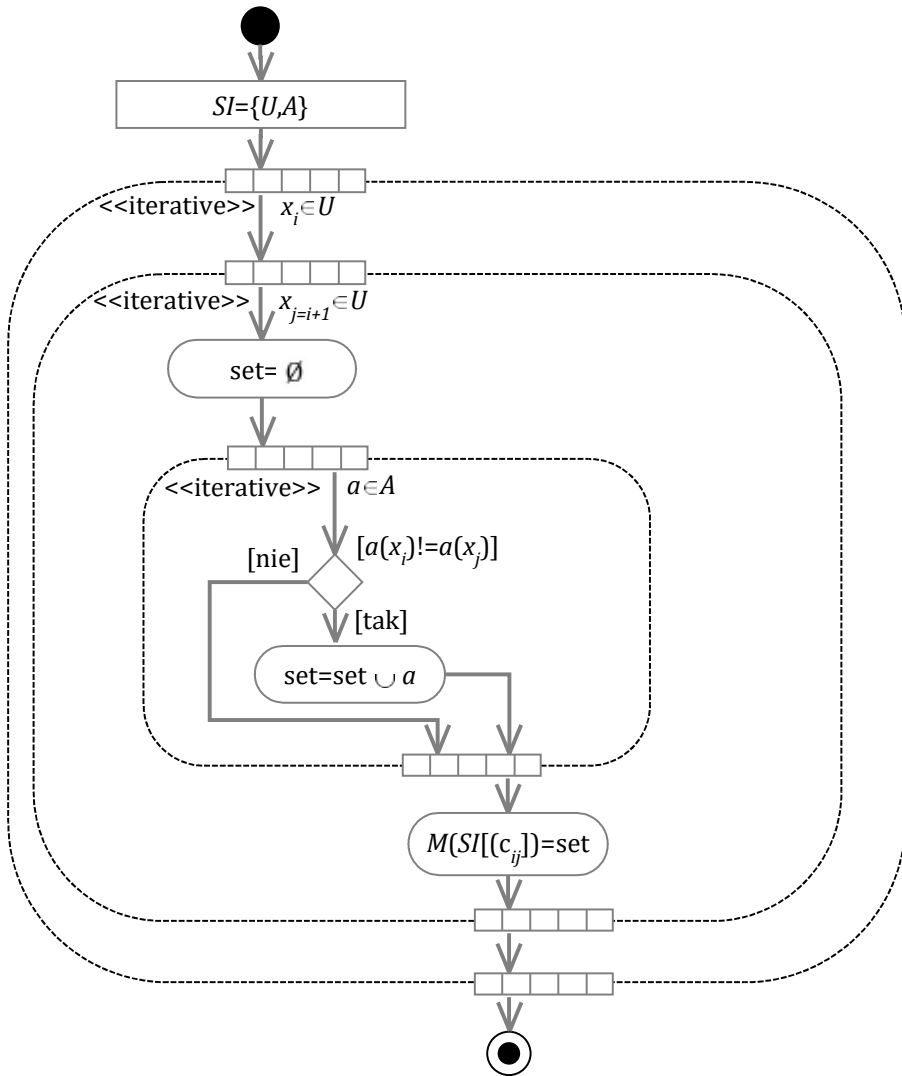
⁴¹² A. Nowak, *Teoretyczne podstawy zbiorów przybliżonych*, http://zsi.tech.us.edu.pl/~nowak/se/se_rs.pdf [19.11.2019].

⁴¹³ M. Kopczyński, T. Grześ, J. Stepaniuk (2014), *Realizacja algorytmu sekwencyjnego wyznaczania macierzy rozróżnialności zbiorów przybliżonych w układzie FPGA, PAK*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola” 60(5): 321–324, <http://pak.info.pl/index.php?menu=artykulSzczegol&idArtyku=4032> [19.11.2018].

⁴¹⁴ P. Szczuko, B. Kostek, *Sztuczna inteligencja...*, op. cit.

⁴¹⁵ R.W. Świniarski, A. Skowron, *Rough set methods...*, op. cit.

⁴¹⁶ A. Nowak (2013), *Zbiory przybliżone w obszarze systemów ekspertowych*, <http://zsi.tech.us.edu.pl/~anowak/files/pawlak.pdf> [19.11.2018].

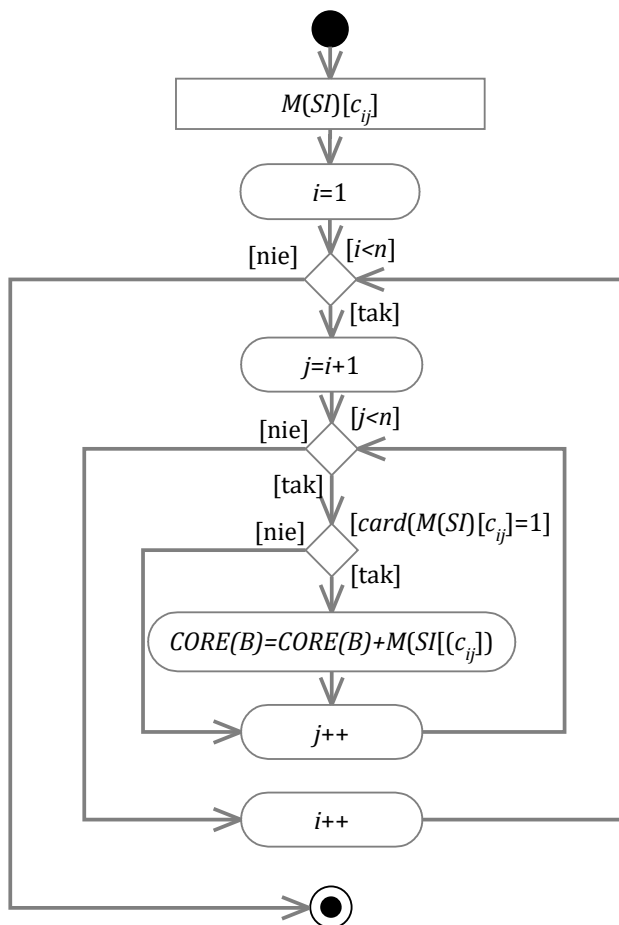


Rysunek 3.4. Algorytm wyznaczania macierzy nierozróżnialności

Źródło: opracowanie własne.

Algorytm uzupełnia elementy macierzy $M(SI)[c_{ij}]$ zbiorem tych atrybutów, dla których obiekty uniwersum x_i, x_j mają różne wartości, tzn. $a(x_i) \neq a(x_j)$, co oznacza, że są rozróżnialne na podstawie wartości tych atrybutów.

Generowanie rdzenia z macierzy rozróżnialności polega na połączeniu wszystkich tych elementów macierzy, które zawierają zbiory jednostkowe i występują w macierzy rozróżnialności pojedynczo: $CORE(A) = \{a \subseteq A: c_{ij} = \{a\}\}$. Algorytm przedstawiono na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5. Algorytm wyznaczania reduktów z macierzy

Źródło: opracowanie własne na podstawie A. Nowak, *Teoretyczne podstawy...*, op. cit.

Algorytm znajdowania reduktów z macierzy rozróżnialności rozpoczyna się od wyznaczenia wszystkich możliwych podzbiorów atrybutów. Redukty są wskazywane spośród podzbiorów, które zawierają rdzeń $CORE(B)$ i mają niepuste przecięcie z każdym niepustym elementem macierzy rozróżnialności $M(SI)$. Ponadto, ponieważ redukt jest podzbiorem o najmniejszej zapewniającej rozróżnialność liczbie atrybutów spośród otrzymanych podzbiorów atrybutów, należy dodatkowo usunąć nadzbiory wyznaczonych reduktów. Duża złożoność przedstawionych podstawowych algorytmów i liczba możliwych reduktów w praktycznych zastosowaniach były motywem do opracowania udoskonalonych, o mniejszej złożoności czasowej i pamięciowej rozwiązań, implementa-

cji równoległych i przybliżonych, a także propozycji rozwiązań sprzętowych⁴¹⁷. W wypadku oceny technologii rozmiar zbiorów danych, w tym zazwyczaj niewielka liczba rozważanych technologii, w zestawieniu z mocą obliczeniową współczesnych komputerów pozwala na bezproblemowe wykorzystanie w tych zadaniach standardowych algorytmów redukcji kryteriów.

Do rozwiązania pozostaje natomiast wybór ostatecznego zestawu atrybutów (kryteriów) spośród wyznaczonych reduktów. Podstawowa zasada sformułowana przez A.I. Dimitrasa i in.⁴¹⁸ mówi, że ostateczny zestaw powinien zawierać jak najmniejszą liczbę atrybutów i jednocześnie nie powinien ominąć atrybutów ocenianych przez decydentów jako najistotniejsze.

Inkorporację przedstawianego hybrydowego modelu, wykorzystującego triadę dwóch narzędzi: model DEA i koncepcje wywodzące się z teorii zbiorów przybliżonych do procesu priorytetyzacji technologii w warunkach niepewności, przedstawiono w rozdziale 3.2.

3.2. Hybrydowy model priorytetyzacji w procesie oceny technologii

Proces oceny technologii jest tematem wielu naukowych dyskusji. Ogólne ramy procesu rankingowania technologii zaproponowali na przykład K. Klincewicz i A. Manikowski⁴¹⁹ na podstawie pracy F.T.S. Chana i in.⁴²⁰ W opracowanej propozycji rozpoczyna się od identyfikacji dostępnych alternatywnych technologii i zdefiniowania kryteriów (obiektywnych – liczbowych i subiektywnych – jakościowych). Następnie dobierane są wagi kryteriów oraz ustalane wartości kryteriów dla poszczególnych technologii. Proces kończy agregacja i opracowanie rankingu pozwalającego wskazać priorytetowe technologie. Procedura ta z powodzeniem, często tylko z nieznacznymi adaptacjami, jest stosowana w wielu projektach analizy technologii⁴²¹. Schemat procesu przywołano na rysunku 3.6.

W wypadku wykonywania pierwszych etapów oceny na podstawie wiedzy eksperckiej ogromne znaczenie ma dobór ekspertów. Nawet wyselekcjonowani, wysokiej klasy specjaliści z danej dziedziny mogą różnić się poziomem wiedzy

⁴¹⁷ S.-Y. Jing, G.-L. Li, K. Zeng, W. Pan, C.-M. Liu (2018), *Efficient parallel algorithm for computing rough set approximation on GPU*, "Soft Computing" 22(22): 7553–7569, <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3050-z>; M. Kopczyński, T. Grześ, J. Stepaniuk (2016), *Core for Large Datasets: Rough Sets on FPGA*, "Fundamenta Informaticae" 147(2–3): 241–259, <https://doi.org/10.3233/FI-2016-1407>.

⁴¹⁸ A.I. Dimitras, R. Słowiński, R. Susmaga, C. Zopounidis, *Business failure...*, op. cit.

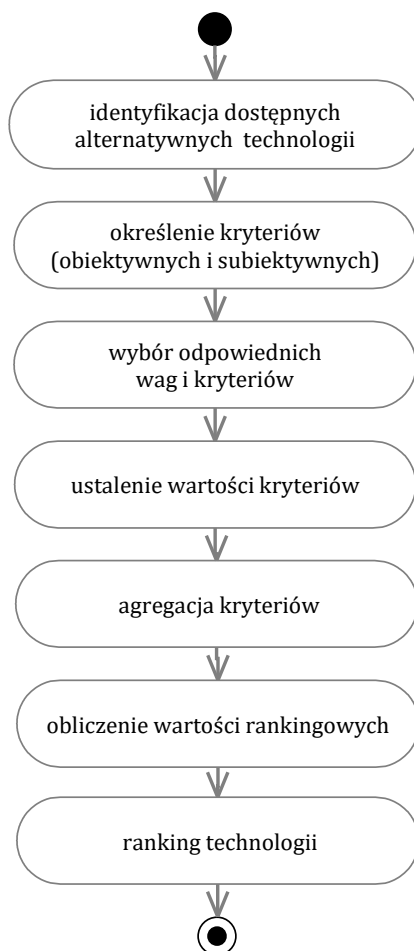
⁴¹⁹ K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

⁴²⁰ F.T.S. Chan, M.H. Chan, N.K.H. Tang, *Evaluation methodologies...*, op. cit.

⁴²¹ B. Poteralska, A. Sacio-Szymańska (2008), *Adaptacja algorytmu prowadzenia procesu foresightu technologicznego w jednostkach badawczo-rozwojowych*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 84–95.

w poszczególnych subobszarach, których dotyczą poruszane tematy. Warto rozważyć potrzebę zróżnicowania odpowiedzi ekspertów, biorąc pod uwagę ich wiedzę.

Przed wszystkim przyjęcie w procesie oceny wykorzystania wiedzy eksperckiej jest w zasadzie równoznaczne z operowaniem na nieprecyzyjnych danych. W literaturze obligatoryjność uwzględnienia zarówno wartości wag, jak i wartości kryteriów, wyrażonych najczęściej na wybranej słownej skali preferencji, obejmuje na przykład diagram oceny i selekcji technologii opracowany przez F.T.S. Chana i in.⁴²² Postulowana jest w tym celu trójkątna funkcja przynależności do zbioru rozmytego.



Rysunek 3.6. Proces oceny, rankingowania i selekcji technologii

Źródło: opracowanie własne na podst.: K. Klincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie...*, op. cit.

⁴²² Ibidem.

Ilustracje wykorzystania algorytmu z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych do selekcji technologii odnaleźć można między innymi w pracach: S.-J. Chuu⁴²³, F.T.S. Chana i in.⁴²⁴ (proponowane przez autorów etapy analizy przedstawiono w tabeli 3.1), czy też w formie silniej zagregowanej, na przykład w publikacjach: S.K. Lee i in.⁴²⁵, Y.-C. Sheniego in.⁴²⁶, H. Luchenga i in.⁴²⁷. Spotykane też są alternatywne rozwiązania, np. C.-J. Chen i in.⁴²⁸ wykorzystali w tym celu statystykę szarą. Aczkolwiek w wielu projektach analizy i oceny technologii kwestia nieostrości wykorzystywanych opinii bywa pomijana⁴²⁹.

Zastosowanie hybrydowego modelu priorytyzacji w procesie oceny technologii lokuje się po etapie identyfikacji dostępnych alternatywnych technologii, określeniu kryteriów i skal pomiaru oraz zebraniu ocen decydentów co do wartości kryteriów poszczególnych alternatyw. Użycie hybrydowego modelu umożliwia konkretyzację niespójności/nieprecyzyjności ocen eksperckich, lecz wymaga spełnienia pewnych założeń.

Wykorzystanie w hybrydowym modelu zadania programowania liniowego DEA zakłada ocenę za pomocą relacji efektywności, wprowadzonej w rozdziale 2.2, tzn. stosunku funkcji efektów do funkcji nakładów charakteryzujących daną technologię. Najwyższe oceny uzyskują technologie przynoszące potencjalnie najwyższe korzyści w stosunku do kosztów. Konsekwencją jest konieczność rozpatrywania kryteriów w co najmniej dwóch perspektywach. Wszystkie analizowane cechy muszą być rozdzielone na dwa typy: koszty (negatywne) i korzyści (pozytywne) oraz uwzględniane jako nakłady i efekty.

⁴²³ S.-J. Chuu (2009), *Selecting the advanced manufacturing technology using fuzzy multiple attributes group decision making with multiple fuzzy information*, "Computers & Industrial Engineering" 57(3): 1033–1042, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.011>.

⁴²⁴ F.T.S. Chan, H.K. Chan, M.H. Chan, P.K. Humphreys (2006), *An integrated fuzzy approach for the selection of manufacturing technologies*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 27: 747–758, <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2246-9>.

⁴²⁵ S.K. Lee, G. Mogi, K.S. Hui, *A fuzzy analytic hierarchy process...*, op. cit.

⁴²⁶ Y.-C. Shen, G.T.R. Lin, G.-H. Tzeng (2011), *Combined DEMATEL techniques with novel MCDM for the organic light emitting diode technology selection*, "Expert Systems with Applications" 38: 1468–1481, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.056>.

⁴²⁷ H. Lucheng, L. Xin, L. Wenguang (2010), *Research on emerging technology selection and assessment by technology foresight and fuzzy consistent matrix*, "Foresight" 12(2): 77–89, <https://doi.org/10.1108/14636681011035762>.

⁴²⁸ C.-J. Chen, M.-C. Chung, C.-H. Wei, *Government policy of technology...*, op. cit.

⁴²⁹ J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit.; *Australia 2030...*, op. cit.; K. Klusacek, *Selection...*, op. cit.

Tabela 3.1. Przykładowe etapy oceny i wyboru technologii

Autorzy: F.T.S. Chan, M.H. Chan, H.K. Chan, P.K. Humphreys (2006)

Krok 1. Zebranie grupy ekspertów

Krok 2. Sformułowanie hierarchii kryteriów subiektywnych (określenie lingwistycznych przekształconych na liczby rozmyte) i obiektywnych (np. ekonomicznych, wyrażonych ilościowo w wartościach pieniężnych)

Krok 3. Określenie wag kryteriów bezpośrednio, korzystając z trójkątnych liczb rozmytych albo pośrednio, stosując porównania parami

Krok 4. Agregacja danych – łączenie wag kryteriów i rozmytych ocen rozpatrywanych alternatyw

Krok 5. Budowa rankingu

Krok 6. Wybór technologii

Autor: S.-J. Chuu (2009)

Krok 1. Zebranie grupy ekspertów oraz identyfikacja wszystkich alternatyw

Krok 2. Identyfikacja kryteriów subiektywnych i obiektywnych oraz ich typu (koszt/korzyść)

Krok 3. Określenie odpowiednich terminów lingwistycznych do oceny jakościowej kryteriów subiektywnych oraz odpowiednich skal liczbowych kryteriów obiektywnych

Krok 4. Zebranie ocen co do ważności kryteriów subiektywnych oraz ocen poszczególnych alternatyw

Krok 5. Agregacja zebranych danych: lingwistycznych ocen alternatyw oraz ważności poszczególnych kryteriów

Krok 6. Transformacja ważonego ratingu na odpowiednie liczby rozmyte

Krok 7. Zebranie ocen dotyczących ważności kryteriów obiektywnych oraz ilościowych ocen poszczególnych alternatyw

Krok 8. Standaryzacja ocen ilościowych

Krok 9. Agregacja zebranych danych: standaryzowanych ratingów i oceny ważności kryteriów

Krok 10. Konwersja liczb rozmytych na rozmyte macierze oceny

Krok 11. Agregacja rozmytych macierzy ocen alternatyw poszczególnych ekspertów

Krok 12. Agregacja rozmytych macierzy oceny każdej z alternatyw

Krok 13. Wyostrzenie rozmytego wektora oceny w celu otrzymania oceny rankingowej każdej z alternatyw; zależenie wartości maksymalnej

Źródło: opracowanie własne.

Dychotomiczne ujęcie kryteriów to na przykład analiza w aspekcie społecznych i ekonomicznych kosztów oraz korzyści, którą zaproponowali H. Lee i in.⁴³⁰ Analizowane przez autorów koszty społeczne obejmowały: negatywny wpływ na środowisko, nieakceptację technologii, pogłębienie nierówności, zaś koszty ekonomiczne: początkowe nakłady inwestycyjne, koszty rozwoju. Z kolei do korzyści społecznych zaliczono: wzrost zamożności, zwiększenie produktywności, tworzenie miejsc pracy, rozwój przemysłu towarzyszącego. Natomiast korzyści ekonomiczne stanowiły: zaspokojenie potrzeb publicznych, poprawa jakości życia, ochrona środowiska, poprawa stanu zdrowia, wzrost bezpieczeństwa. Niemniej istnieje również możliwość przyjęcia jednolitych nakładów bądź

⁴³⁰ H. Lee, C. Lee, H. Seol, Y. Park, *On the R&D priority...*, op. cit.

efektów dla wszystkich analizowanych technologii⁴³¹ i priorytetyzacja tylko pod względem korzyści lub tylko kosztów. Ponadto w analizie uwzględnić można wpływ czynników niezależnych od technologii, lecz wpływających na końcową ocenę tzw. czynników niekontrolowanych (egzogenicznych).

Postulowane wykorzystanie w hybrydowym modelu priorytetyzacji technologii metody zbiorów przybliżonych do redukcji kryteriów jest w pewnym stopniu także pochodną specyfiki modeli DEA. Ewentualna potrzeba redukcji kryteriów oceny wynika z faktu, że metoda DEA posiada możliwości klasyfikacyjne, jeśli liczba kryteriów jest 3–5 razy mniejsza od liczby ocenianych technologii. Sugerowana w literaturze minimalna liczba obiektów analizy jest definiowana jako: $\max\{M \times S, 3(M + S)\}$, gdzie M i S to odpowiednio liczba nakładów i efektów⁴³². W wielu wypadkach trudno jest uzyskać konsensus ekspertów co do najbardziej istotnych kryteriów oceny. W celu redukcji liczby zmiennych lub uzyskania zmiennych syntetycznych popularnym sposobem postępowania jest wykorzystanie narzędzi bazujących na współczynnikach korelacji, takich jak na przykład analiza czynnikowa⁴³³. Ze względu na charakter analizy technologicznej – nieliczny zbiór technologii opisywanych przez wiele kryteriów o wartościach lingwistycznych, wymagających kodowania – adekwatnym rozwiązaniem, zdaniem autorki, jest wyznaczenie reduktów zbiorów przybliżonych⁴³⁴.

Kwestia ujęcia niespójności ocen w hybrydowym modelu, jak wskazano w rozdziale 3.1, polega na transformacji zebranych opinii eksperckich do postaci zmiennej przybliżonej. Tym samym postuluje się dwa przybliżenia wyrażonej oceny jako zakresu wartości liczbowych na pewno należących do wyrażenia oraz być może należących. W przypadku pojedynczej oceny eksperckiej zapis eliminujący kategorię z założenia nieprecyzyjnego wyrażenia mógłby przyjąć formę przedstawioną w tabeli 3.2. Zamieszczone przykładowe wartości liczbowe zmiennej przybliżonej odpowiadają czterem wyrażeniami określającym siłę hipotetycznej „preferencji”.

⁴³¹ E. Chodakowska (2014), *Construction of the Environmental Performance Index Using DEA*, “Quantitative Methods in Economics” 15(2): 296–306, http://qme.sggw.pl/pdf/MIBE_T15_z2_28.pdf.

⁴³² A. Emrouznejad, K. De Witte, (2010), *COOPER-framework: A unified process for non-parametric projects*, “European Journal of Operational Research” 207(3): 1573–1586, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.025>.

⁴³³ N. Adler, B. Golany (2001), *Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe*, “European Journal of Operational Research” 132(2): 260–273, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00150-8); N. Adler, B. Golany (2002), *Including Principal Component Weights to improve discrimination in Data Envelopment Analysis*, “Journal of the Operational Research Society” 53(9): 985–991, <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601400>.

⁴³⁴ E. Chodakowska, J. Nazarko, *Rough Sets...*, op. cit.

Tabela 3.2. Modelowanie niepewności lingwistycznej

Zmienna lingwistyczna	Zmienna przybliżona
Słabo preferowana	[0,1; 0,3], [0; 0,4]
Średnio preferowana	[0,3; 0,5], [0,2; 0,6]
Silnie preferowana	[0,5; 0,7], [0,4; 0,8]
Wyjątkowo silnie preferowana	[0,7; 0,9], [0,6; 1]

Źródło: opracowanie własne.

W sytuacji wykorzystywania w procesie oceny panelu głosów eksperckich na problem nieprecyzyjności ocen nakłada się problem niespójności zebranych ocen eksperckich. Konieczność agregowania nierzadko skrajnych opinii eksperckich można zrealizować za pomocą prostego rozwiązania – zaprojektowania przybliżeń zbiorów odpowiedzi, wykorzystując współczynnik dyspersji⁴³⁵:

$$h = \frac{k}{k-1} (1 - \sum_j f_j^2), h \in [0,1], \quad (3.21)$$

gdzie:

k – liczba wariantów odpowiedzi,

f_j – częstość występowania j -tego wariantu wśród odpowiedzi.

Nominalny wskaźnik dyspersji (3.21) przyjmuje wartości od 0 do 1, gdzie 0 wskazuje brak rozproszenia (oceny ekspertów są spójne), zaś 1 oznacza, że obserwacje są równomiernie rozłożone pomiędzy klasami (nie ma zgodności wśród ekspertów).

W przypadku zastosowania w kwestionariuszach skal z jednopunktowymi różnicami pomiędzy kolejnymi ocenami wykorzystanie wskaźnika dyspersji może mieć formę przedstawioną wzorem (3.22), wyrażając koncepcję: im mniej spójne są odpowiedzi, tym szerszy jest przedział:

$$\xi = ([o - p_1 h, o + p_1 h], [o - p_2 h, o + p_2 h]), \quad \text{dla } p_1 \leq p_2, \quad (3.22)$$

gdzie:

o – zagregowana odpowiedź ekspertów (średnia),

p_1, p_2 – arbitralnie wybrany procent,

h – współczynnik dyspersji.

W literaturze i praktyce analizy technologii bywają używane inne, zarówno prostsze, jak i bardziej wyrafinowane, podejścia do estymacji nieprecyzyjności określeń słownych, ale też i niespójności ocen eksperckich. P. Radziszewski i in.⁴³⁶

⁴³⁵ P. Goos, D. Meintrup (2015), *Statistics with JMP: Graphs, Descriptive Statistics and Probability*, John Wiley & Sons, s. 70.

⁴³⁶ P. Radziszewski, J. Nazarko, T. Vilutiene, K. Dębikowska, J. Ejdys, A. Gudanowska, K. Halicka, J. Kilon, A. Kononiuk, K.J. Kowalski, J.B. Król, Ł. Nazarko, M. Sarnowski, *Future trends...*, op. cit.

oraz K. Cuhls i T. Kuwahara⁴³⁷ w badaniach wykorzystali nadawanie wag liczbie poszczególnych ocen, najwyższe najbardziej pozytywnym wskazaniom:

$$I = \frac{100n_h + 75n_m + 25n_l + 0n_n}{n_h + n_m + n_l + n_n}, \quad (3.23)$$

gdzie:

- I – indeks,
- n_h – liczba odpowiedzi z wartością „wysokie”,
- n_m – liczba odpowiedzi z wartością „średnie”,
- n_l – liczba odpowiedzi z wartością „niskie”,
- n_n – liczba odpowiedzi z wartością „brak”.

Spotykany substytutem wskaźnika dyspersji jest rozstęp⁴³⁸ bądź inne miary rozrzutu, np. odchylenie standardowe⁴³⁹. Dodatkowo formułę (3.22) można rozbudować poprzez wprowadzenie operacji na zbiorach przybliżonych do agregowania, wyrażonych za pomocą zmiennych przybliżonych odpowiedzi eksperckich. Również, pozostając w obszarze teorii zbiorów przybliżonych, sama zmienna przybliżona może być zmienną rozmytą przybliżoną albo przybliżoną rozmytą. Przy wyborze rozwiązania i jego złożoności niezbędne jest uwzględnienie aspektu kosztu i czasu skomplikowania obliczeń, istotna jest także przystępność i łatwość zrozumienia wyników modelu⁴⁴⁰. Przeprowadzenie oceny technologii przy wykorzystaniu „czarnej skrzynki” z algorytmem oceny niekoniecznie sprzyja akceptacji wyników, co może przełożyć się na przyszłe (nie)wykorzystanie oceny w praktycznym podejmowaniu decyzji⁴⁴¹.

Bez względu na wybrane rozwiązanie projektowania przybliżeń efektem wykorzystania zmiennej przybliżonej $\xi = ([a,b], [c,d])$ przekształconej w zakres wyrażający α -optymistyczną i α -pesymistyczną ocenę kryterium $[\xi_{sup}(\alpha), \xi_{inf}(\alpha)]$ w modelu DEA będzie przedziałowa ocena technologii przy wybranym α . Przy czym dla zakresu $0,5 \leq \alpha \leq 1$ wyższa wartość α implikuje szerszy przedział oceny. Dla $\alpha = 0,5$ otrzymuje się $\xi_{sup}(\alpha) = \xi_{inf}(\alpha)$ i tym samym ocena jest jednoznaczna.

Przywołując informacje z rozdziału 2.2, należy przypomnieć, że wśród różnych opracowanych modeli DEA wskazane jest zastosowanie modeli nadefek-

⁴³⁷ K. Cuhls, T. Kuwahara, *Outlook...*, op. cit.

⁴³⁸ L. Song, S. Jin (2015), *Production performance evaluation based on rough set theory and wavelet neural network*, "Journal of Intelligent & Fuzzy Systems" 29: 2429–2437, <https://doi.org/10.3233/IFS-151943>.

⁴³⁹ C.-H. Wang, Y.-C. Chin, G.-H. Tzeng, *Mining the R&D innovation...*, op. cit.

⁴⁴⁰ R.J. Brooks, A.M. Tobias (1996), *Choosing the best model: Level of detail, complexity, and model performance*, "Mathematical and Computer Modelling" 24(4): 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.011>.

⁴⁴¹ E.M. Rogers (1983), *Diffusion of Innovations*. Third Edition, The Free Press, New York, s. 16, 230; E. Gummesson (2017), *Case Theory in Business and Management: Reinventing Case Study Research*, SAGE Publications Ltd., s. 84.

tywności – SE-DEA w celu klasyfikacji obiektów efektywnych. Różnicowanie obiektów tworzących granicę efektywności jest szczególnie istotne w wypadku, gdy pomimo ograniczenia liczby kryteriów przy użyciu metody zbiorów przybliżonych, liczba obiektów analizy nadal jest porównywalna lub nieznacznie większa od liczby kryteriów. Rezultatem będzie liczna grupa efektywnych technologii. Zastosowanie modeli SE-DEA pozwala na rozróżnienie jednostek efektywnych.

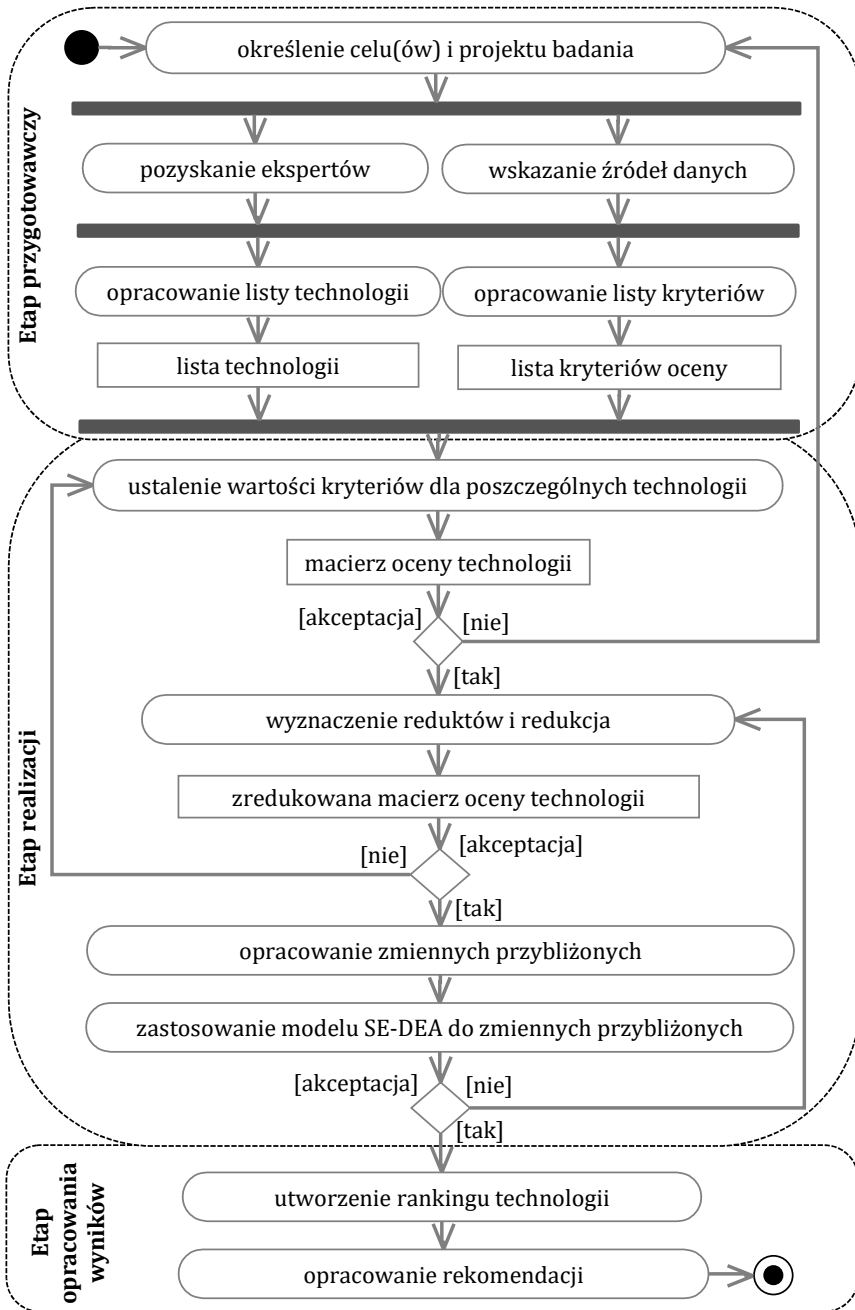
Wskazując potrzebę przygotowania danych do analizy metodą DEA, warto podkreślić brak konieczności określania wag poszczególnych kryteriów. Metoda DEA w literaturze bywa określana jako metoda obiektywna, gdyż w zadaniu programowania liniowego dla każdej ocenianej technologii indywidualnie dobierana jest najlepsza kombinacja wag maksymalizująca jej końcową ocenę⁴⁴².

Podsumowując przedstawione rozważania, na bazie przeprowadzonej analizy literatury z zakresu metodologii i metod oceny technologii, a także specyfiki wykorzystywanych narzędzi, zaproponowano schemat procesu priorytyzacji technologii wykorzystujący hybrydowy model. Obejmuje on trzy podstawowe etapy: (i) przygotowanie danych, (ii) redukcję kryteriów oraz (iii) właściwą ocenę. W ramach tych etapów stosowane są sekwencyjnie: metoda upraszczania macierzy z teorii zbiorów przybliżonych oraz metoda DEA operująca na zmiennych przybliżonych. Opracowany schemat procesu realizacji projektu priorytyzacji technologii z wykorzystaniem hybrydowego modelu oceny przedstawiono na rysunku 3.7.

Wykorzystanie hybrydowego modelu poprzedza standardowa dla każdego projektu oceny technologii faza opracowania koncepcji i definicji celów badania⁴⁴³. Odpowiada ona określeniu problemu badawczego i jego specyfikacji, formułowaniu pytań badawczych, podjęciu decyzji co do oczekiwanych rezultatów oraz planowaniu i organizacji badania. Faza ta obejmuje dyskusje dotyczące wyboru najbardziej odpowiedniej techniki pozyskiwania danych i ich źródeł, wybór konkretnych ekspertów i określenie ich roli oraz zasad współpracy z nimi. Wymagania tej fazy to przede wszystkim wysokie umiejętności komunikacyjne zarówno kierownika, jak i członków zespołu pozwalające uzyskać konsensus.

⁴⁴² J. Nazarko, M. Komuda, K. Kuźmicz, E. Szubzda, J. Urban (2008), *Metoda DEA w badaniu efektywności instytucji sektora publicznego na przykładzie szkół wyższych*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 4(18): 89–10.

⁴⁴³ A. Emrouznejad, K. De Witte (2010), *COOPER-framework: A unified process for non-parametric projects*, “European Journal of Operational Research” 207(3): 1573–1586, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.025>; Y. Liu, C. Sun, S. Xu, *Eco-Efficiency Assessment...*, op. cit.



Rysunek 3.7. Schemat procesu priorytyzacji technologii z wykorzystaniem hybrydowego modelu

Źródło: opracowanie własne.

W etapie realizacji można wyróżnić przygotowanie danych, redukcję i priorytetyzację. Przygotowanie danych obejmuje definicję zbioru ocenianych technologii, określenie kryteriów oceny, ich rodzaju (nakład/efekt) i wartości. Wyniki tej fazy to macierz posiadająca w wierszach wartości oceny technologii pod względem określonych w kolumnach kryteriów. Klasyfikacja kryteriów generalnie powinna być przeprowadzona na podstawie oceny merytorycznej z ewentualnym wspomaganie analizy statystycznej. Analiza statystyczna może być zaimplementowana do detekcji błędów pomiaru, odnalezienia obserwacji odstających czy zaproponowania uzupełnienia brakujących danych. Przygotowane dane mogą zostać poddane redukcji, a wcześniej, jeżeli jest taka konieczność, dyskretyzacji. Wśród wyznaczonych reduktów wybiera się te najmniej liczne, a jednocześnie zawierające najistotniejsze kryteria. Pewność niepustego zbioru kryteriów reprezentujących nakłady lub efekty otrzyma się, przeprowadzając redukcję w podzbiorach nakładów i efektów. Zredukowany, lecz jednocześnie satysfakcjonujący zbiór danych jest podstawą modelowania nieostrych pojęć lub/i niespójności ocen i wejściem do procesu optymalizacji za pomocą modelu SE-DEA. Proces realizacji projektu priorytetyzacji technologii zamyka faza opracowania wyników i rekomendacji.

Opracowany algorytm oceny technologii może być elastycznie uzupełniany o dodatkowe uznane za istotne elementy (metody czy procedury). Przedstawiony proces oceny jest sekwencyjny w tym sensie, że konsekwencje decyzji podejmowanych w poprzednich fazach ponoszone są w następnych. Istnieje możliwość wprowadzenia sprzężeń zwrotnych – co zostało zilustrowane na schemacie w postaci powrotu do wcześniejszych faz. Jednakże analizując celowość powrotów i powtórzeń, należy uwzględnić wpływ tych kroków na koszty i czas projektu.

Rozważając zaprezentowany schemat oceny technologii za pomocą hybrydowego modelu pod względem wykonawców poszczególnych etapów, należy wyróżnić trzy najważniejsze grupy: (i) zespół projektowy pracujący pod nadzorem kierownika, będący wykonawcą projektu oceny technologii, (ii) zaangażowanych ekspertów oraz (iii) użytkowników-odbiorców, którzy często także są sponsorami projektu oceny technologii. Etap przygotowawczy to praca wykonana przez zespół projektowy przy uwzględnieniu wymagań użytkowników oraz istniejących ograniczeń, w tym finansowych. Przygotowanie danych to zadanie ekspertów wykonywane pod kierownictwem zespołu projektowego. Etap redukcji i priorytetyzacji technologii wymaga podjęcia decyzji co do wyboru reduktu oraz metody projektowania przybliżeń i jest zadaniem zespołu projektowego przy współpracy ekspertów i ewentualnym uwzględnieniu preferencji finalnych użytkowników rankingu technologii. Rekomendacje generalnie opracowuje zespół projektowy.

Przekładając zaprezentowany na schemacie 3.7 opis słowny procesu na przedstawione w rozdziale 2 oraz 3.1 definicje, wzory i algorytmy, etap przygo-

towania danych to opracowanie macierzy, która w teorii zbiorów przybliżonych określana jest mianem systemu informacyjnego:

$$SI = \{U, A\}, \tag{3.24}$$

gdzie:

A – niepusty zbiór atrybutów (kryteriów) zakwalifikowanych do nakładów i efektów, tj. $A = \{x_1, x_2, \dots, x_{M^*}, y_1, y_2, \dots, y_{S^*}\}$,

M^* – pierwotna liczba nakładów,

S^* – pierwotna liczba efektów.

Każdą alternatywną technologię $T_j, j = 1, 2, \dots, n$ w rozważanym zbiorze opisuje wektor wejść: $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}, \dots, x_{jM^*})$ i wektor wyjść $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{js}, \dots, y_{jS^*})$. Tym samym SI ma postać macierzy:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1M^*} & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1S^*} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2M^*} & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2S^*} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3M^*} & y_{31} & y_{32} & \dots & y_{3S^*} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & \dots & x_{4M^*} & y_{41} & y_{42} & \dots & y_{4S^*} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & \dots & x_{5M^*} & y_{51} & y_{52} & \dots & y_{5S^*} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & \dots & x_{6M^*} & y_{61} & y_{62} & \dots & y_{6S^*} \\ x_{71} & x_{72} & x_{73} & \dots & x_{7M^*} & y_{71} & y_{72} & \dots & y_{7S^*} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nM^*} & y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nS^*} \end{bmatrix}. \tag{3.25}$$

Redukcja danych przeprowadzana jest w dwóch podsystemach systemu informacyjnego: nakładów i efektów. Niezależnie, w obu podsystemach, wyszukiwane jest jądro $CORE(B)$ i redukty $RED(B)$. Jeżeli jądro jest jedynym reduktom, tzn. $U/IND(B) = U/IND(CORE(B))$, ogranicza się zbiór kryteriów do atrybutów jądra, w przeciwnym wypadku wyznaczane są wszystkie redukty, a wśród nich wybiera się jeden. Zastosowany redukt powinien obejmować najistotniejsze kryteria i może być wskazany przez ekspertów, być najmniej liczny zbiorem lub obejmować atrybuty najczęściej pojawiające się w wyznaczonych reduktach.

Ograniczona do atrybutów reduktów macierz SI przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1M} & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1S} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2M} & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2S} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3M} & y_{31} & y_{32} & \dots & y_{3S} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & \dots & x_{4M} & y_{41} & y_{42} & \dots & y_{4S} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} & \dots & x_{5M} & y_{51} & y_{52} & \dots & y_{5S} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} & \dots & x_{6M} & y_{61} & y_{62} & \dots & y_{6S} \\ x_{71} & x_{72} & x_{73} & \dots & x_{7M} & y_{71} & y_{72} & \dots & y_{7S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nM} & y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nS} \end{bmatrix}, \tag{3.26}$$

gdzie:

M – uwzględniana w hybrydowym modelu liczba nakładów, $M \leq M^*$;

S – uwzględniana w modelu SE-DEA dla zmiennych przybliżonych liczba efektów, $S \leq S^*$.

Zredukowana macierz oceny technologii jest podstawą zaprojektowania zmiennych przybliżonych:

$$\begin{aligned} & [x_{mj}^a, x_{mj}^b], [x_{mj}^c, x_{mj}^d], \\ & [y_{sj}^a, y_{sj}^b], [y_{sj}^c, y_{sj}^d], \end{aligned} \quad (3.27)$$

gdzie:

$m = 1, \dots, M,$

$s = 1, \dots, S.$

Następnie, przyjmując dany poziom α , taki że: $0,5 \leq \alpha \leq 1$, obliczane są wartości α -optymistyczne i α -pesymistyczne dla każdego kryterium z grupy nakładów i efektów każdej technologii:

$$\begin{aligned} & [x_{jm}^{sup(\alpha)}, x_{jm}^{inf(\alpha)}], \\ & [y_{js}^{sup(\alpha)}, y_{js}^{inf(\alpha)}]. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Bazując na zaprojektowanych ocenach kryteriów (3.28), rozwiązywane jest zadanie programowania liniowego SE-DEA i otrzymywany jest zakres wskaźników efektywności każdej technologii T_j dla przyjętego poziomu α : $[\theta_j^{sup(\alpha)}, \theta_j^{inf(\alpha)}]$.

Podsumowując, ramy sugerowanego procesu oceny technologii z wykorzystaniem zaprojektowanego hybrydowego modelu są standardowe: gromadzenie danych, analiza i ocena. Różna jest struktura etapu analizy i wynikająca ze stosowanych narzędzi konieczność przygotowania danych.

Proponowany algorytm oceny, zawierający wytyczne i wskazówki, pomaga w uporządkowaniu projektu priorytyzacji technologii. Zastosowanie prezentowanego hybrydowego modelu w procesie oceny umożliwia wytypowanie priorytetowych technologii pod względem wybranych aspektów. Model przeznaczony jest przede wszystkim do wspierania procesów decyzyjnych o charakterze strategicznym, dotyczących oceny technologii w warunkach niepewności.

Prezentowany schemat priorytyzacji przedstawia całościową procedurę oceny technologii, przy założeniu wykorzystania hybrydowego modelu już na etapie projektowania badania. Możliwe jest również zastosowanie modelu do analizy danych z projektów, w których pierwotnie zaplanowano użycie innych metod oceny technologii. Zakłada się wówczas, że właściwie został przeprowa-

dzony etap przygotowawczy i zebrane dane są poprawne. Natomiast aplikacja metody rozpoczyna się od klasyfikacji analizowanych kryteriów, jeżeli wcześniej nie została wykonana, i wyznaczenia reduktów. Taki przykład zastosowania hybrydowego modelu dla danych uzyskanych w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» zawarto w rozdziale 4.

W rozdziale opracowano autorski hybrydowy model priorytetyzacji technologii, wykorzystując wyprowadzone wzory i zależności. Wykorzystane koncepcje zbiorów przybliżonych i metody DEA uzupełniają się: (i) pozwalając ograniczyć liczbę rozważanych zmiennych, (ii) eliminując konieczność arbitralnego wyboru systemu wag w formule agregacji budującej syntetyczny wskaźnik oceny technologii, (iii) ujmując niepewność danych, a także (iv) za pomocą relacji efektywności uwzględniając nie tylko atrakcyjność technologii, ale też racjonalność zużycia lub wykorzystania zasobów. Pozwala to przyjąć, że hybrydowy model jest wartościowym alternatywnym rozwiązaniem w zakresie priorytetyzacji technologii. Zaprojektowany algorytm oceny można traktować jako referencyjny sposób postępowania w zadaniach dotyczących priorytetyzacji technologii.

4. Weryfikacja hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii na podstawie «NT FOR Podlaskie 2020»

W rozdziale przedstawiono wyniki numerycznych obliczeń przeprowadzonych na podstawie danych projektu foresightu technologicznego «NT FOR Podlaskie 2020» w celu weryfikacji i sprawdzenia przydatności hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii. Porównano wyniki otrzymane za pomocą proponowanego modelu z rezultatami zastosowanej w projekcie popularnej metody kluczowych technologii. Konfrontacja wyników i sposobów wykonania oceny priorytetyzacji technologii została przeprowadzona w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie badawcze: jakie są ilościowe i jakościowe efekty zastosowania hybrydowego modelu w porównaniu z tradycyjną metodą kluczowych technologii?

Ocenę proponowanego hybrydowego modelu oceny technologii zaprezentowano na przykładzie danych zebranych w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020». Regionalna strategia rozwoju nanotechnologii⁴⁴⁴.

Projekt «NT FOR Podlaskie 2020», realizowany w latach 2009–2013, był próbą konstrukcji scenariusza pożądanego rozwoju społeczno-gospodarczego województwa podlaskiego⁴⁴⁵. Jego celami cząstkowymi były: identyfikacja kluczowych trajektorii naukowo-badawczych, projekcja podlaskiej strategii rozwoju nanotechnologii oraz identyfikacja priorytetowych nanotechnologii zorientowanych na rozwój województwa podlaskiego⁴⁴⁶.

Wybór nanotechnologii, „które w najwyższym stopniu przyczynią się do zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego województwa oraz potencjalnych możliwości wykorzystania nanotechnologii na rzecz istniejących oraz nowych branż przemysłu”⁴⁴⁷, był przeprowadzany w siedmiu sprecyzowanych, podstawowych dla województwa obszarach zastosowań oraz w grupie pozostałych⁴⁴⁸:

- przemysł drzewny,
- medycyna,

⁴⁴⁴ Projekt finansowany ze środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Priorytet I. Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.1. Wsparcie badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy, Poddziałanie 1.1.1. Projekty badawcze z wykorzystaniem metody foresight. Beneficjentem projektu była Politechnika Białostocka, a Instytucją Wdrażającą – Ośrodek Przetwarzania Informacji (OPI).

⁴⁴⁵ Strona internetowa projektu «NT FOR Podlaskie 2020», <http://ntfp2020.pb.edu.pl/pl/cms/view/article/id/20/title/0%2Bprojekcie> [5.08.2018].

⁴⁴⁶ Ibidem.

⁴⁴⁷ J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit., s. 9.

⁴⁴⁸ Ibidem, s. 36.

- przemysł odzieżowy,
- budownictwo i konstrukcje,
- rolnictwo i przemysł spożywczy,
- przemysł maszynowy i transport,
- ochrona środowiska,
- pozostałe.

Wybrana metodyka badawcza zakładała stworzenie katalogu kluczowych nanotechnologii za pomocą metody kluczowych technologii bazującej na ocenie technologii kandydujących względem atrakcyjności oraz wykonalności, a następnie ich priorytetyzację na podstawie kryterium dojrzałości technologicznej. Pierwszym etapem procedury wyłonienia kluczowych technologii było opracowanie wstępnego katalogu technologii z przypisanym obszarem zastosowań na podstawie wiedzy eksperckiej – listy nanotechnologii kandydujących. Sporządzona przez zespół badawczy lista liczyła 57 technologii (tabela 4.1).

Tabela 4.1. Lista rozważanych technologii w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020»

Obszar zastosowań	Kategoria	Technologia	Symbol
Przemysł drzewny	Nanomateriały z drewna i roślin	Produkcja nanocelulozy	T1
		Wytwarzanie nanowłókien celulozowych metodą formowania w polu elektrycznym o wysokim gradiencie	T2
	Nanotechnologie dla przetwórstwa i ochrony drewna	Nanotechnologie dla narzędzi tnących i przetwórstwa drewna	T3
		Nanotechnologie dla ochrony drewna (mechanicznej, fizycznej, chemicznej, biologicznej)	T4
Medycyna	Nanocząstki dla medycyny, terapia, diagnostyka, teranostyka	Technologie nanoproszków do zastosowań biomedycznych	T5
		Nanokontenery precyzyjnie dostarczające leki do komórek	T6
		Nanotechnologie związane z systemami uwalniania leków	T7
		Produkcja biokosmetyków i leczniczych specyfików ziołowych w nanoonośnikach	T8
		Celowana nanoterapia	T9

Obszar zastosowań	Kategoria	Technologia	Symbol	
Medycyna	Nanocząstki dla medycyny, terapia, diagnostyka, teranostyka	Nanocząsteczki magnetyczne pod kątem ich różnorodnego wykorzystania jako: nośnik leku w lokalnej terapii magnetycznej; elementy diagnostyki medycznej; czynniki robocze w hipertermii magnetycznej	T10	
		Nanotoksykologia	T11	
		Nanodiagnostyka	T12	
		Synteza nanocząsteczek jako czynnika diagnostycznego i terapeutycznego w chorobach nowotworowych	T13	
	Nanorusztowania dla medycyny regeneracyjnej	Technologie regeneracji tkanek w oparciu o nanomaterię	T14	
		Nanoinżynieria tkanek	T15	
		Produkcja implantów układu kostnego	T16	
	Nanokompozyty dla ortopedii i dentystyki	Materiały kompozytowe na stałe wypełnienia stomatologiczne	T17	
		Kompozytowy materiał na bazie stopów tytanu z napełniaczem węglowym do zastosowań w połączeniach kinematycznych implantów dokostnych	T18	
		Biomateriał	T19	
	Nanowarstwy dla medycyny	Nanomateriały i nanopakrycia w sprzęcie medycznym	T20	
		Nanotechnologie warstw wierzchnich do zastosowań biomedycznych	T21	
		Wytwarzanie warstw i powłok o strukturze manometrycznej z wykorzystaniem hybrydowych metod PVD	T22	
	Przemysł odzieżowy	Nanowłókna (z nanostruktury powierzchniowej lub objętościowej) dla przemysłu tekstylnego	Produkcja nanotkanin do specjalnych zastosowań	T23
			Nanotechnologie związane z tkaninami specjalnymi, np. materiałami opatrunkowymi	T24
			Zbrojenie materiałów polimerowych nanowłóknami	T25

Obszar zastosowań	Kategoria	Technologia	Symbol
Budownictwo i konstrukcje	Nanokompozyty polimerowe	Zbrojenie ceramiki budowlanej nanowłókna- mi w różnym składzie chemicznym	T26
		Technologie nanostrukturyzacji warstw wierzchnich o specjalnych właściwościach mechanicznych, fizycznych, chemicznych i biologicznych	T27
		Nanowarstwy zmieniające właściwości po- wierzchni w wyrobach przemysłu szklarskiego	T28
		Kompozyty polimerowe na bazie akrylowej z napełniaczem nanosrebra	T29
		Samoczyszczące powłoki do szerokiego spec- trum zastosowań	T30
		Technologie proszkowe do wykorzystania w przetwórstwie tworzyw sztucznych, kom- pozycji farb i lakierów	T31
Rolnictwo i przemysł spo- żywczy	Nanonawozy	Produkcja nanonawozów z użyciem nanoczą- steczek, łatwiej wchłanianych przez rośliny oraz zwiększających jakość upraw	T32
	Nanotechnologie dla bezpieczeń- stwa żywności	Nanotechnologie w produkcji opakowań żyw- ności	T33
		Produkcja inteligentnych opakowań	T34
		Technologia nanosensorów do produkcji i te- stowania (produkowanej) żywności	T35
		Nanowarstwowe powłoki antybakteryjne dla aparatury produkcyjnej przemysłu spożyw- czego	T36
Przemysł maszynowy i transport	Nanosmary	Zastosowanie nanokomponentów smarują- cych w elementach maszyn i urządzeń warsz- tatowych	T37
	Nanometale konstrukcyjne	Technologie nanostrukturyzacji metali i sto- pów lekkich, w szczególności oparte na meto- dach dużego odkształcenia plastycznego	T38
Ochrona środowiska	NanoczuJNIKI dla ochrony środowiska	Produkcja nanoczuJNIKÓW do monitorowania stanu środowiska	T39
		Nanocząsteczki w kontroli zanieczyszczenia wód	T40
		Technologia nanokodów paskowych do wcze- snej diagnostyki roślin	T41

Obszar zastosowań	Kategoria	Technologia	Symbol
Ochrona środowiska	Nanomembrany dla ochrony środowiska	Technologia wytwarzania nanostrukturalnych filtrów włókninowych do oczyszczania gazów i cieczy	T42
		Nanokatalizatory do ochrony powietrza	T43
		Selektywne membrany chemiczne, biologiczne, optyczne itd. typu: polimer-nanocząstka	T44
		Nanomembrany do oczyszczania wody	T45
	Nanotechnologia dla energii odnawialnej	Technologie nanokompozytów do baterii słonecznych	T46
		Produkcja ogniw paliwowych	T47
		Wytwarzanie wydajnych ogniw fotowoltaicznych	T48
Pozostałe obszary zastosowań	Nanofotonika	Nanomateriały dla techniki światłowodowej (materiały typu szkło-ceramika)	T49
		Projektowanie i wytwarzanie zaawansowanych konstrukcji optoelektronicznych (np. lasery włóknowe, czujniki optoelektroniczne)	T50
		Technologia światłowodów niekonwencjonalnych (światłowody o specjalnych konstrukcjach optymalizowanych pod kątem konkretnych zastosowań)	T51
		Techniki nieelastycznego rozpraszania światła (głównie z wykorzystaniem efektu Brillouina i Ramana) z czasową i przestrzenną rozdzielczością	T52
		Technologia osadzania z fazy gazowej CVD (<i>Chemical Vapor Deposition</i>) kompozytowych nanomateriałów optoelektronicznych do detekcji skażenia środowiska, wykrywania materiałów niebezpiecznych itp.	T53
	Spintronika	Nanomateriały magnetyczne pod kątem zastosowań w spintronice oraz w zastosowaniach biologicznych, medycznych	T54
		Ultraszybkie metody badań procesów magnetycznych z wykorzystaniem femtosekundowych laserów	T55

Obszar zastosowań	Kategoria	Technologia	Symbol
Pozostałe obszary zastosowań	Nanoprocesy produkcyjne	Metody pozwalające na strukturyzację z wykorzystaniem technik litografii optycznej, elektronowej oraz wiązek jonowych (głównie FIB – Focus Ion Beam)	T56
		Techniki dyspersji nanocząstek, w szczególności nanorurek węglowych w osnowach polimerowych, celem uzyskania wyrobów o wyższych właściwościach mechanicznych, termicznych i przewodnictwie	T57

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Kolejnym etapem realizowanym w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» było przygotowanie roboczego zbioru kryteriów odnoszących się do wykonalności i atrakcyjności na podstawie przeglądu literatury i propozycji ekspertów. Uporządkowana lista kryteriów została poddana eksperckiej ocenie przydatności, co pozwoliło sformułować ostateczny zbiór kryteriów obejmujący 13 kryteriów atrakcyjności i 8 wykonalności, będący podstawą wyboru technologii kluczowych⁴⁴⁹ (zaprezentowany w tabelach 4.2 i 4.3).

Tabela 4.2. Zestawienie kryteriów atrakcyjności

Symbol	Opis
A1	Wpływ rozwoju technologii na atrakcyjność inwestycyjną regionu (przyciąganie nowych znaczących inwestorów)
A2	Wpływ rozwoju technologii na wzrost inwestycji prywatnych w B+R
A3	Wpływ rozwoju technologii na poziom B+R w regionie
A4	Możliwość łatwej komercjalizacji
A5	Możliwość wykorzystania potencjału naukowego, aparaturowego oraz przemysłowego regionu
A6	Konkurencyjność technologii względem dostępnych rozwiązań (patentów)
A7	Wpływ rozwoju technologii na możliwość tworzenia mocnej pozycji konkurencyjnej podlaskich przedsiębiorstw
A8	Wpływ rozwoju technologii na tworzenie nowych miejsc pracy
A9	Efektywność ekonomiczna
A10	Pobudzenie przedsiębiorczości, w tym MŚP, <i>spin-off</i> lub <i>start-up</i>
A11	Prawdopodobieństwo absorpcji technologii w istniejącym przemyśle Podlasia
A12	Możliwość szerokiego rozpowszechniania i wykorzystania wyników
A13	Prawdopodobieństwo absorpcji technologii w nowo tworzonych gałęziach przemysłu

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

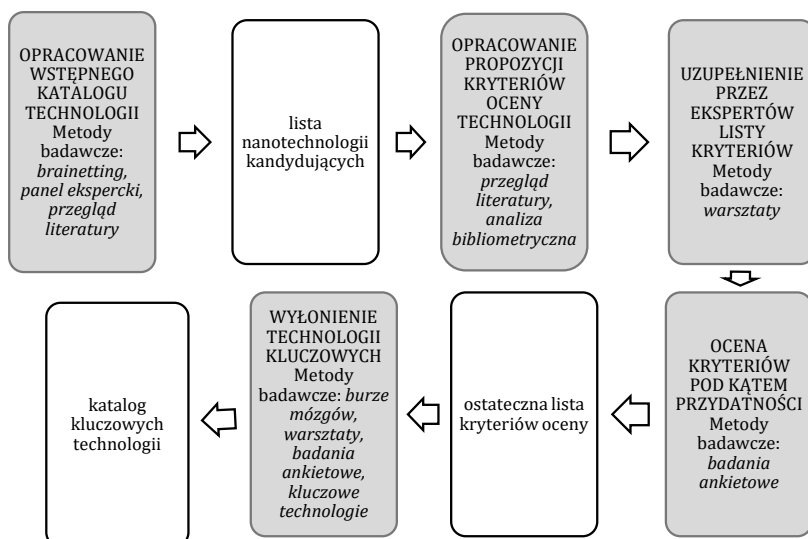
⁴⁴⁹ J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit., s. 36-37.

Tabela 4.3. Zestawienie kryteriów wykonalności

Symbol	Opis
W1	Dostęp do funduszy ułatwiających wdrożenie technologii
W2	Wykonalność finansowa (możliwość finansowania) wdrożenia technologii
W3	Wykonalność techniczna i wdrożeniowa
W4	Jakość zasobów kadrowych w obrębie branży
W5	Dostępność wykwalifikowanej kadry
W6	Niezbędna infrastruktura badawczo-rozwojowa
W7	Zainteresowanie biznesu regionu wdrażaniem nowych technologii
W8	Możliwość wytworzenia/zakupu wymaganego oprzyrządowania technicznego i technologicznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Schemat zastosowanej w projekcie zoperacjonalizowanej metodyki badawczej zilustrowano na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Schemat procesu badawczego «NT FOR Podlaskie 2020» Regionalna strategia rozwoju nanotechnologii

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit., s. 13, 37.

Eksperci projektu «NT FOR Podlaskie 2020» technologie kandydujące oceniali pod względem każdego z kryterium poprzez wskazanie wartości ze skali od 1 od 5, oznaczającej stopień atrakcyjności/wykonalności, gdzie 1 oznaczał

bardzo niski, 2 niski, 3 przeciętny, 5 bardzo wysoki. Dodatkowo eksperci subiektywnie określali swoją wiedzę w poszczególnych obszarach zastosowania technologii, również w pięciostopniowej skali⁴⁵⁰. Podstawą zakwalifikowania do zbioru technologii kluczowych była ponadprzeciętna wartość średniej z wartości kryteriów wykonalności oraz średniej z kryteriów atrakcyjności, ważonych deklarowanym poziomem wiedzy ekspertów.

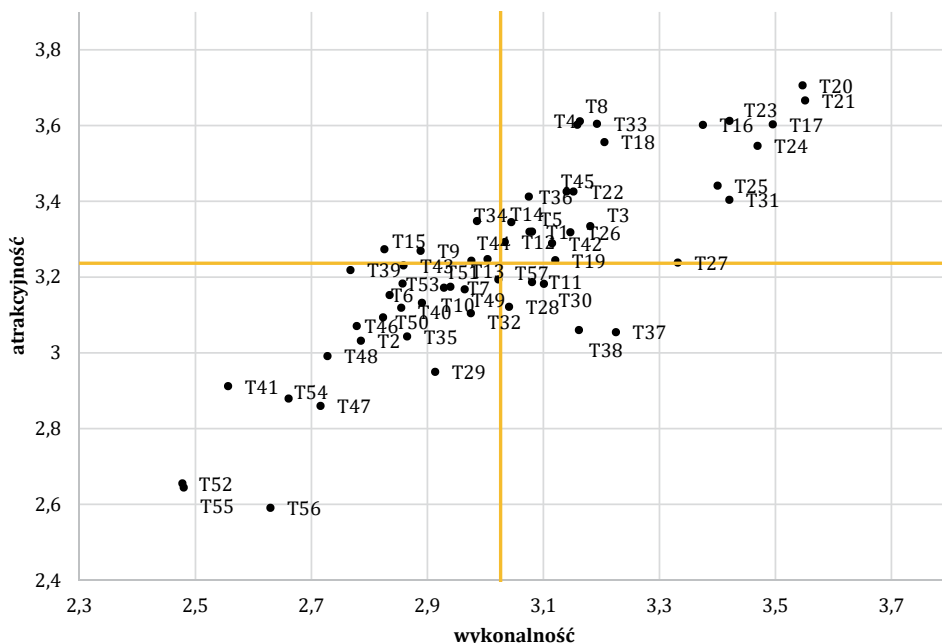
Należy zaznaczyć, że przedstawione w tej części monografii analizy bazują na otrzymanych od wykonawców projektu «NT FOR Podlaskie 2020» danych surowych w postaci ankiet (chyba że zaznaczono inaczej). W przypadku odwzorowanych analiz, w celu porównania wyników z hybrydowym modelem, mimo otrzymanej generalnej zgodności wyników z zamieszczonymi w pracy J. Nazarko i A. Magruk (2013)⁴⁵¹ odnotowano pewne różnice w otrzymanych wartościach liczbowych. Przepuszczalnie jest to rezultat nieuwzględnienia dodatkowych założeń, dotyczących na przykład uzupełniania brakujących danych, uściśleń czy zaokrągleń wartości, niewskazanych w opisie, a wykonywanych w trakcie przetwarzania danych przy realizacji projektu «NT FOR Podlaskie 2020». Konsekwencje różnic w wartościach liczbowych wykazują zestawienia prezentowane w tabeli. 4.4.

Odwzorowanie wyboru technologii w projekcie ilustruje wykres atrakcyjności i wykonalności technologii z zaznaczoną wartością średnią obu zagregowanych kryteriów, przedstawiony na rysunku 4.2.

W projekcie rozważane było też nieuwzględnienie opinii o poziomie wiedzy i wykorzystanie średniej arytmetycznej. Obniżyłoby to nieznacznie osiąganą przeciętną ocenę wykonalności i atrakcyjności, a także wykluczyłoby z katalogu technologii kluczowych technologie ocenione nieco wyżej przez ekspertów deklarujących relatywnie wyższy poziom wiedzy w danym obszarze. Wykres wartości średniej arytmetycznej z kryteriów atrakcyjności i wykonalności bez uwzględnienia wiedzy przedstawia rysunek 4.3.

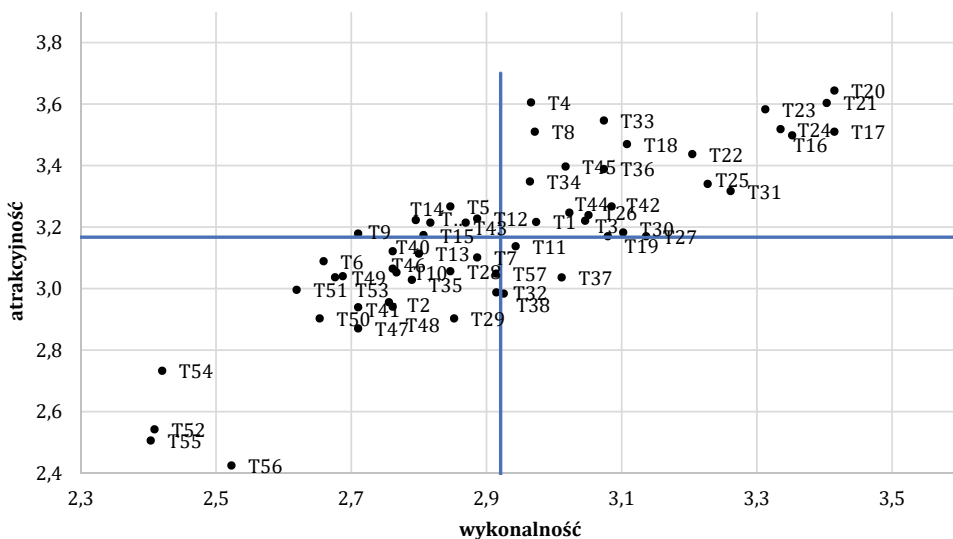
⁴⁵⁰ Ibidem, s. 45.

⁴⁵¹ Ibidem.



Rysunek 4.2. Wykres atrakcyjności i wykonalności ważonej deklarowanym poziomem wiedzy ekspertów

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit.



Rysunek 4.3. Wykres atrakcyjności i wykonalności bez uwzględnienia wiedzy eksperckiej

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit.

Zestawienie technologii kluczowych wyłonionych na podstawie średniej arytmetycznej i średniej ważonej ocen technologii (za J. Nazarko i A. Magruk (2013) oraz obliczenia własne (na podstawie danych projektu) zaprezentowano w tabeli 4.4. Wartości kryteriów atrakcyjności i wykonalności zawierają załączniki.

Tabela 4.4. Lista kluczowych technologii na podstawie średniej z uwzględnieniem poziomu wiedzy ankietowanych oraz bez uwzględnienia

Technologie wyłoni- one na podstawie śred- niej ważonej wiedzą ekspertką w projek- cie «NT FOR Podlaskie 2020» (J. Nazarko i A. Magruk (2013))	Technologie, które mogłyby być wyłoni- one na podstawie śred- niej arytmetycznej wg wartości opubliko- wanych w J. Nazarko i A. Magruk (2013)	Technologie wyłoni- one na podstawie średniej ważonej wiedzą ekspertką wg danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020»	Technologie wyłoni- one na podstawie średniej arytmetycznej wg danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020»
T1	T1	T1	
T3	T3	T3	T3
T4	T4	T4	T4
T5	T5	T5	T5
T8	T8	T8	T8
	T12	T12	T12
T14		T14	
T16	T16	T16	T16
T17	T17	T17	T17
T18	T18	T18	T18
	T19	T19	T19
T20	T20	T20	T20
T21	T21	T21	T21
T22	T22	T22	T22
T23	T23	T23	T23
T24	T24	T24	T24
T25	T25	T25	T25
T26	T26	T26	T26
	T27	T27	T27
	T30		T30
T31	T31	T31	T31
T33	T33	T33	T33
	T34		T34

Technologie wyłoni- ne na podstawie śred- niej ważonej wiedzy ekspertką w projek- cie «NT FOR Podlaskie 2020» (J. Nazarko i A. Magruk (2013))	Technologie, które mogłyby być wyłoni- ne na podstawie śred- niej arytmetycznej wg wartości opubliko- wanych w J. Nazarko i A. Magruk (2013)	Technologie wyło- nione na podstawie średniej ważonej wiedzą ekspercką wg danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020»	Technologie wyło- nione na podstawie średniej arytmety- cznej wg danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020»
T36	T36	T36	T36
T38			
T42	T42	T42	T42
	T44		T44
T45	T45	T45	T45

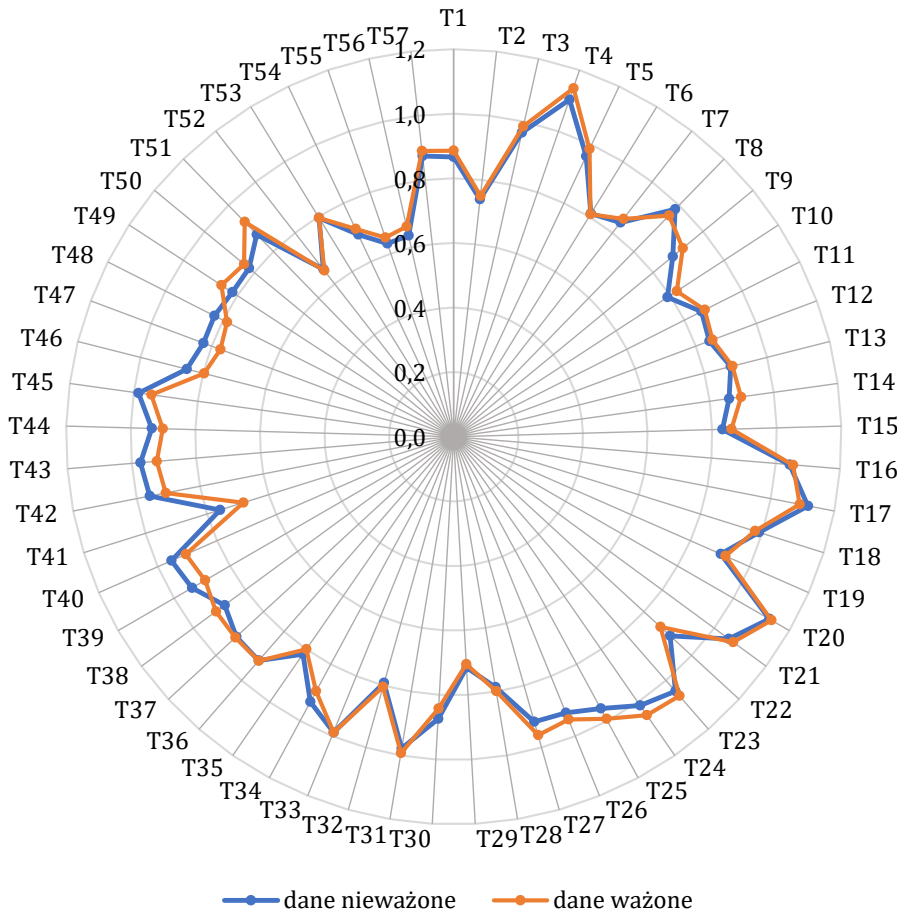
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020» oraz J. Nazarko, A. Magruk (red.), *Kluczowe nanotechnologie...*, op. cit.

Niezależnie od sposobu agregowania wyników badań ankietowych otrzymany katalog kluczowych technologii jest wysoce zgodny. W odwzorowywanych obliczeniach wykorzystanie prostej średniej arytmetycznej bez uwzględnienia subiektywnego poziomu wiedzy wyklucza z analizy technologię T1 (którą charakteryzowała przyjęta wartość graniczna wykonalności) oraz T14, natomiast dołącza do zbioru T30, T34, T44.

Przyjęcie średnich wartości kryteriów atrakcyjności i wykonalności oznacza traktowanie wszystkich kryteriów równoważnie. Nie pozwala to wyróżnić kryteriów szczególnie istotnych dla danej technologii. Zaimplementowanie metody DEA pozwala, przy pewnych ograniczeniach (opisanych w rozdziale 2.2), dopasować wartości wag kryteriów tak, aby uwypuklić mocne strony każdej technologii. Zastosowanie i weryfikacja prezentowanego w monografii modelu odbędzie się przy założeniu, odnosząc się do przedstawionego w rozdziale 3.2 procesu oceny, poprawnego przeprowadzenia dyskusji etapu przygotowawczego, a także pierwszego etapu realizacyjnego oceny technologii, to znaczy: zebrania i transformacji danych do postaci „systemu informacyjnego” ze wskazanymi atrybutami nakładów (kryteria wykonalności) i efektów (kryteria atrakcyjności).

W pracy, w celu porównania wyników dla zredukowanego i niezredukowanego zbioru danych, zaimplementowano najpierw zwykły model SE-DEA zarówno dla średnich arytmetycznych, jak i ważonych wskazywanym poziomem wiedzy eksperta w danym obszarze. Wyniki otrzymane za pomocą modelu SE-DEA CCR dla zbioru 57 technologii, 13 kryteriów atrakcyjności – efektów oraz 8 kryteriów wykonalności traktowanych jako nakłady, to znaczy o odwróconych wartościach odpowiedzi (umożliwiając tym samym pozytywne interpretowanie spadku wartości poszczególnych kryteriów wykonalności), zaprezentowano w tabeli 4.5 i na wykresie na rysunku 4.4. Zbiór technologii wskazywanych jako kluczowe przez metodę DEA zaimplementowaną dla danych nieważonych,

a także metodę DEA dla danych ważonych jest identyczny i obejmuje: T4, T16, T17, T20, T21, T23, T24. Warto odnotować również wysoką spójność uporządkowania wszystkich, nie tylko kluczowych, technologii w opracowanych rankingach. Zgodność rankingów mierzona współczynnikiem korelacji Spearmana wynosi 0,941, zaś Kendalla 0,802.



Rysunek 4.4. Wyniki metody DEA dla 21 kryteriów z uwzględnieniem wiedzy eksperckiej i bez niej

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Tabela 4.5. Rankingi technologii na podstawie modeli SE-DEA przy 21 kryteriach atrakcyjności i wykonalności

Nr	Technologia	Wynik DEA (dane nieważone)	Technologia	Wynik DEA (dane ważne)
1.	T20	1,13	T4	1,14
2.	T17	1,12	T20	1,14
3.	T4	1,10	T17	1,09
4.	T21	1,06	T21	1,07
5.	T23	1,05	T23	1,06
6.	T16	1,04	T16	1,05
7.	T24	1,01	T24	1,05
8.	T18	0,99	T25	0,99
9.	T33	0,99	T31	0,99
10.	T45	0,99	T33	0,99
11.	T8	0,98	T3	0,99
12.	T31	0,98	T5	0,99
13.	T43	0,97	T18	0,98
14.	T3	0,97	T27	0,96
15.	T5	0,96	T8	0,96
16.	T42	0,96	T26	0,95
17.	T25	0,96	T45	0,95
18.	T40	0,95	T51	0,93
19.	T39	0,94	T43	0,92
20.	T44	0,94	T36	0,92
21.	T34	0,93	T9	0,92
22.	T26	0,92	T19	0,92
23.	T36	0,92	T37	0,92
24.	T27	0,92	T38	0,91
25.	T37	0,91	T42	0,91
26.	T22	0,91	T40	0,91
27.	T19	0,90	T44	0,90
28.	T13	0,89	T14	0,90
29.	T38	0,88	T34	0,90
30.	T9	0,88	T13	0,89
31.	T30	0,88	T57	0,89
32.	T57	0,88	T39	0,89

Nr	Technologia	Wynik DEA (dane nieważone)	Technologia	Wynik DEA (dane ważne)
33.	T51	0,87	T1	0,89
34.	T1	0,87	T11	0,87
35.	T14	0,86	T22	0,87
36.	T11	0,86	T15	0,86
37.	T46	0,85	T49	0,86
38.	T12	0,85	T12	0,86
39.	T7	0,84	T7	0,86
40.	T15	0,83	T30	0,84
41.	T48	0,83	T50	0,84
42.	T47	0,83	T10	0,83
43.	T50	0,82	T6	0,81
44.	T35	0,82	T32	0,81
45.	T49	0,82	T35	0,80
46.	T6	0,81	T28	0,80
47.	T53	0,80	T46	0,80
48.	T32	0,79	T53	0,80
49.	T10	0,79	T48	0,79
50.	T28	0,79	T47	0,77
51.	T41	0,76	T2	0,75
52.	T2	0,74	T54	0,71
53.	T29	0,72	T29	0,71
54.	T54	0,69	T41	0,68
55.	T52	0,66	T56	0,67
56.	T56	0,64	T52	0,65
57.	T55	0,63	T55	0,65

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020». Czcionką pogrubioną zaznaczono technologie kluczowe wskazane w poszczególnych badaniach.

Konfrontując wyniki otrzymane za pomocą metody DEA z katalogiem kluczowych technologii w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020», należy podkreślić, że zbiór technologii optymalnych wskazanych modelami DEA liczy tylko 7 technologii i są to technologie z katalogu kluczowych technologii projektu. Pozwala to skoncentrować uwagę na technologiach rzeczywiście priorytetowych lub, jeżeli istnieje taka potrzeba, analizę kolejnych, wykorzystując listę rankingową.

Autorzy projektu «NT FOR Podlaskie 2020», bazując na średniej, pominięli problem istnienia wysokiej korelacji zmiennych w obrębie zbioru kryteriów

atrakcyjności i wykonalności, niezależnie od tego, czy rozważane są dane ważone czy nie (tabele 4.6 i 4.7 oraz 4.8 i 4.9). Wysoka wartość współczynników oznacza, że pewne kryteria mogą opisywać współwystępujące cechy technologii bądź wprost wyznaczać wartość innych kryteriów. Tym samym w ocenie uwzględnia się powielone informacje.

W celu zastosowania metody zbiorów przybliżonych do redukcji kryteriów został wykorzystany program napisany w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej ROSE 2⁴⁵². Etap dyskretyzacji ciągłych wartości kryteriów wykonano za pomocą zaimplementowanych w programie algorytmów metody minimalizacji entropii⁴⁵³, zaproponowanej przez U.M. Fayyada i K.B. Iraniego (1993)⁴⁵⁴. Dyskretyzacja do zbioru $\{0,1,2\}$ zawiera wskazanie liczby przedziałów jako dodatkowego warunku stopu algorytmu dyskretyzacji. Następnie wyznaczano jądra oraz redukty oddzielnie dla zbiorów kryteriów atrakcyjności i wykonalności⁴⁵⁵.

Rodzaj wykonywanej dyskretyzacji poprzez wyznaczenie określonej liczby przedziałów bezpośrednio przekłada się na rozróżnialność technologii, a tym samym na wyłanianie atrybuty jądra i licznosc reduktów. Generalnie, im mniej liczne są redukty, tym mniej jest zmiennych wejściowych i/lub wyjściowych w modelu DEA, co z kolei oznacza mniej jednostek kwalifikowanych jako 100% efektywne. Rozważania dotyczące wyboru kryteriów zawierają odpowiednio tabele 4.10 i 4.11 dla danych nieważonych wiedzą ekspercką oraz 4.12 i 4.13 dla danych ujmujących deklarowany poziom wiedzy.

⁴⁵² B. Predki, R. Słowiński, J. Stefanowski, R. Susmaga, S. Wilk (1998), *ROSE - Software Implementation of the Rough Set Theory*, w: L. Polkowski, A. Skowron (red.), *Rough Sets and Current Trends in Computing*, "Lecture Notes in Artificial Intelligence" 1424, Springer-Verlag, Berlin: 605–608; B. Predki, S. Wilk (1999), *Rough Set Based Data Exploration Using ROSE System*, w: Z.W. Ras, A. Skowron (red.), *Foundations of Intelligent Systems*, "Lecture Notes in Artificial Intelligence" 1609. Springer-Verlag, Berlin: 172–180; strona internetowa Zakład Inteligentnych Systemów Wspomagania Decyzji, Instytut Informatyki Politechniki Poznańskiej, <http://idss.cs.put.poznan.pl/site/rose.html> [10.08.2018].

⁴⁵³ Rose 2 User's Guide, http://idss.cs.put.poznan.pl/site/fileadmin/projects-images/rose_manual.pdf [10.08.2018].

⁴⁵⁴ U.M. Fayyad, K.B. Irani (1993), *Multi-interval discretization of continuous-valued attributes for classification learning*, "Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93)", <https://www.ijcai.org/Proceedings/93-2/Papers/022.pdf> [10.08.2018]; U.M. Fayyad, K.B. Irani (1992), *On the Handling of Continuous-Valued Attributes in Decision Tree Generation*, "Machine Learning" 8(1): 87–102, <https://doi.org/10.1007/BF00994007>.

⁴⁵⁵ Ze względu na ograniczenia programu wprowadzona została dodatkowa zmienna decyzyjna.

Tabela 4.6. Macierz korelacji Pearsona kryteriów atrakcyjności (dane nieważone)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
A1	1,000												
A2	0,919	1,000											
A3	0,727	0,630	1,000										
A4	0,870	0,924	0,569	1,000									
A5	0,824	0,787	0,543	0,793	1,000								
A6	0,648	0,511	0,702	0,452	0,579	1,000							
A7	0,845	0,772	0,768	0,732	0,816	0,775	1,000						
A8	0,834	0,883	0,531	0,881	0,781	0,523	0,764	1,000					
A9	0,846	0,824	0,635	0,803	0,726	0,587	0,816	0,865	1,000				
A10	0,898	0,843	0,713	0,786	0,840	0,693	0,859	0,825	0,891	1,000			
A11	0,742	0,821	0,439	0,831	0,833	0,435	0,674	0,820	0,743	0,741	1,000		
A12	0,802	0,713	0,772	0,682	0,718	0,789	0,894	0,748	0,791	0,838	0,592	1,000	
A13	0,664	0,683	0,603	0,694	0,460	0,513	0,643	0,630	0,673	0,632	0,614	0,655	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną wskazano korelacje >0,7 (korelacja bardzo wysoka według klasyfikacji J. Guilforda). Wszystkie korelacje są statystycznie istotne z $p < 0,05$.

Tabela 4.7. Macierz korelacji Pearsona kryteriów wykonalności (dane nieważone)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
W1	1,000							
W2	0,831	1,000						
W3	0,653	0,848	1,000					
W4	0,604	0,775	0,881	1,000				
W5	0,635	0,733	0,857	0,919	1,000			
W6	0,622	0,733	0,871	0,879	0,948	1,000		
W7	0,751	0,891	0,861	0,765	0,794	0,844	1,000	
W8	0,646	0,804	0,882	0,756	0,756	0,802	0,874	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną wskazano korelacje >0,7 (korelacja bardzo wysoka według klasyfikacji J. Guilforda). Wszystkie korelacje są statystycznie istotne z $p < 0,05$.

Tabela 4.8. Macierz korelacji kryteriów atrakcyjności (dane ważone)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
A1	1,000												
A2	0,883	1,000											
A3	0,675	0,544	1,000										
A4	0,790	0,866	0,462	1,000									
A5	0,817	0,748	0,458	0,755	1,000								
A6	0,662	0,486	0,653	0,361	0,549	1,000							
A7	0,821	0,736	0,733	0,648	0,761	0,733	1,000						
A8	0,787	0,830	0,403	0,833	0,758	0,428	0,662	1,000					
A9	0,814	0,767	0,510	0,723	0,692	0,495	0,749	0,829	1,000				
A10	0,886	0,840	0,613	0,747	0,794	0,583	0,811	0,809	0,889	1,000			
A11	0,682	0,786	0,291	0,798	0,790	0,298	0,545	0,775	0,682	0,697	1,000		
A12	0,759	0,715	0,634	0,576	0,644	0,715	0,817	0,684	0,736	0,769	0,518	1,000	
A13	0,646	0,671	0,541	0,706	0,470	0,466	0,650	0,593	0,630	0,653	0,555	0,581	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną wskazano korelacje >0,7 (korelacja bardzo wysoka według klasyfikacji J. Guilforda). Wszystkie korelacje są statystycznie istotne z $p < 0,05$.

Tabela 4.9. Macierz korelacji kryteriów wykonalności (dane ważone)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
W1	1,000							
W2	0,811	1,000						
W3	0,582	0,828	1,000					
W4	0,499	0,701	0,873	1,000				
W5	0,486	0,664	0,849	0,937	1,000			
W6	0,494	0,661	0,860	0,888	0,942	1,000		
W7	0,616	0,814	0,867	0,741	0,771	0,817	1,000	
W8	0,548	0,767	0,851	0,727	0,737	0,773	0,902	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną wskazano korelacje >0,7 (korelacja bardzo wysoka według klasyfikacji J. Guilforda). Wszystkie korelacje są statystycznie istotne z $p < 0,05$.

Tabela 4.10. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane bez uwzględnienia wiedzy) – atrybuty jądra i reduktów

	Dyskretyzacja lokalna	Dyskretyzacja lokalna	Dyskretyzacja lokalna do zbioru {0,1,2}	Dyskretyzacja lokalna do zbioru {0,1,2}	Dyskretyzacja globalna	Dyskretyzacja globalna
CORE	{W7} {W1,W5,W7} {W1,W4,W7} {W1,W3,W7} {W1,W2,W7} {W2,W5,W7}	{A2,A11} {A2,A3,A7,A8,A9,A11} {A2,A5,A10,A11} {A2,A3,A5,A8,A11} {A2,A7,A8,A10,A11}	{W7} {W1,W5,W7} {W1,W4,W7} {W1,W3,W7} {W1,W2,W7} {W2,W5,W7} {W4,W5,W6, W7,W8}	{A11} {A5,A9,A10,A11,A13} {A4,A5,A9,A11,A13} {A3,A5,A9,A11,A13} {A2,A5,A9,A11,A13} {A2,A5,A10,A11} {A2,A5,A8,A11} {A2,A3,A5,A11} {A3,A4,A9,A11,A13} {A2,A3,A9,A11,A13} {A8,A9,A11,A13} {A2,A7,A8,A9,A11} {A2,A7,A8,A10,A11} {A2,A3,A10,A11,A13}	{W1,W2,W7} {W1,W2,W7}	{A4,A5,A7,A9} {A4,A5,A7,A9}
RED						
Atrybuty najczęściej występujące w reduktach	W7, W1, W2, W5	A2, A11, A8	W7, W1, W5	A11, A9, A13, A2, A5		
Redukt wybrany	{W1,W2,W7}	{A2,A3,A5,A8,A11}	{W1,W5,W7}	{A2,A5,A9,A11,A13}	{W1,W2,W7}	{A4,A5,A7,A9}

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

W tabeli 4.10 przedstawiono atrybuty jądra (CORE) i reduktów (RED) otrzymane dla różnych metod dyskretyzacji. Wskazano atrybuty najczęściej pojawiające się w wynikach. Na tej podstawie wybrano redukt każdej metody dyskretyzacji i dla nich sprawdzono zgodność otrzymywanych wyników metodą DEA (tabela 4.11). Niezależnie od wskazanej liczby przedziałów, jako dodatkowego warunku stopu algorytmu dyskretyzacji, za technologie efektywne przyjmowane są zawsze T17 oraz T20. Dodatkowo odnotowano wysoce spójny zbiór pierwszych siedmiu⁴⁵⁶ technologii, obejmujący T4 lub T8 oraz T16, T17, T20, T21, T23, T24 (tabela 4.11).

Tabela 4.11. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane bez uwzględnienia wiedzy) – rankingi metody DEA dla wybranych reduktów

Redukty	{W1,W2,W7}		{W1,W5,W7}		{W1,W2,W7}	
	{A2,A3,A5,A8,A11}		{A2,A5,A9,A11,A13}		{A4,A5,A7,A9}	
Technologie 100% efektywne	T4, T16, T17, T20, T21, T23, T24		T4, T16, T17, T20, T21, T23 (0,989), T24 (0,995)		T16 (0,993), T17, T20, T21 (0,999), T23 (0,989), T24 (0,995)	
Ranking technologii	T17	1,117	T17	1,117	T17	1,089
	T4	1,104	T4	1,093	T20	1,074
	T20	1,069	T20	1,028	T21	0,999
	T16	1,033	T16	1,026	T24	0,995
	T21	1,029	T21	1,007	T16	0,993
	T23	1,018	T24	0,995	T23	0,989
	T24	1,001	T23	0,989	T8	0,960
	T33	0,973	T18	0,981	T4	0,951
	T31	0,951	T33	0,969	T33	0,942
	T18	0,939	T8	0,960	T18	0,925
	T25	0,930	T31	0,949	T31	0,923
	T45	0,926	T25	0,930	T45	0,915
	T44	0,920	T45	0,926	T25	0,891
	T36	0,918	T34	0,923	T5	0,888
	T27	0,917	T36	0,918	T34	0,881
T5	0,910	T27	0,912	T44	0,877	

⁴⁵⁶ Siedem technologii jest wyłanianych jako w pełni efektywne przez metodę DEA zaimplementowaną dla pełnego zbioru kryteriów.

Redukty	{W1,W2,W7}		{W1,W5,W7}		{W1,W2,W7}	
	{A2,A3,A5,A8,A11}		{A2,A5,A9,A11,A13}		{A4,A5,A7,A9}	
Technologie 100% efektywne	T4, T16, T17, T20, T21, T23, T24		T4, T16, T17, T20, T21, T23 (0,989), T24 (0,995)		T16 (0,993), T17, T20, T21 (0,999), T23 (0,989), T24 (0,995)	
Ranking technologii	T40	0,902	T44	0,910	T40	0,874
	T19	0,897	T19	0,896	T30	0,874
	T34	0,892	T42	0,891	T42	0,870
	T42	0,891	T5	0,888	T22	0,869
	T22	0,887	T3	0,884	T27	0,866
	T3	0,886	T43	0,882	T19	0,860
	T43	0,883	T22	0,878	T14	0,846
	T8	0,872	T40	0,877	T12	0,841
	T30	0,864	T30	0,875	T9	0,839
	T26	0,857	T26	0,872	T36	0,835
	T39	0,851	T39	0,851	T3	0,827
	T12	0,840	T1	0,849	T39	0,825
	T14	0,831	T12	0,841	T15	0,816
	T1	0,825	T9	0,839	T46	0,815
	T11	0,823	T37	0,819	T35	0,813
	T13	0,811	T14	0,815	T43	0,809
	T15	0,810	T46	0,815	T11	0,806
	T46	0,800	T35	0,813	T13	0,799
	T48	0,789	T11	0,804	T7	0,794
	T49	0,784	T13	0,791	T48	0,789
	T32	0,781	T48	0,789	T26	0,775
	T28	0,778	T51	0,775	T51	0,775
	T35	0,775	T7	0,775	T47	0,763
	T37	0,773	T28	0,769	T28	0,762
	T9	0,767	T47	0,763	T1	0,758
	T7	0,765	T15	0,761	T6	0,755
	T47	0,762	T57	0,752	T32	0,749
	T6	0,750	T32	0,750	T10	0,748
T50	0,750	T10	0,747	T57	0,747	
T51	0,744	T6	0,747	T38	0,733	
T53	0,741	T38	0,733	T37	0,725	

Redukty	{W1,W2,W7}		{W1,W5,W7}		{W1,W2,W7}	
	{A2,A3,A5,A8,A11}		{A2,A5,A9,A11,A13}		{A4,A5,A7,A9}	
Technologie 100% efektywne	T4, T16, T17, T20, T21, T23, T24		T4, T16, T17, T20, T21, T23 (0,989), T24 (0,995)		T16 (0,993), T17, T20, T21 (0,999), T23 (0,989), T24 (0,995)	
Ranking technologii	T10	0,729	T2	0,727	T49	0,724
	T57	0,727	T49	0,723	T50	0,710
	T38	0,719	T50	0,710	T41	0,708
	T41	0,706	T41	0,707	T53	0,696
	T2	0,687	T29	0,697	T29	0,677
	T29	0,686	T53	0,691	T54	0,651
	T54	0,647	T54	0,633	T2	0,622
	T52	0,584	T56	0,589	T56	0,584
	T55	0,573	T52	0,552	T52	0,567
	T56	0,565	T55	0,549	T55	0,524

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Ostatecznie w hybrydowym modelu w przypadku rozważanego zbioru $U/IND(B) = \{T1, T2, T3, \dots, T57\}$ arbitralnie ujęto maksymalnie zredukowany zbiór 3 atrybutów wykonalności i 4 atrakcyjności, po wykonaniu dyskretyzacji globalnej składający się z jąder zbiorów pierwotnych, tj. dla $B = \{A_1, A_2, \dots, A_{13}\}$ $CORE(B) = \{A_4, A_5, A_7, A_9\}$ oraz dla $B = \{W_1, W_2, \dots, W_8\}$ $CORE(B) = \{W_1, W_2, W_7\}$. Tym samym otrzymany ranking otwierają dwie technologie sklasyfikowane jako efektywne: T17 i T21 oraz trzy z wynikami powyżej 0,99: T21, T24, T16.

Analogiczną analizę przeprowadzono dla ocen eksperckich ważonych informacją o deklarowanym poziomie wiedzy ekspertów z danego obszaru – jej wyniki zaprezentowano w tabelach 4.12 i 4.13.

W przypadku danych ważonych dla rozważanego zbioru $U/IND(B) = \{T1, T2, T3, \dots, T57\}$ przyjęto również maksymalnie zredukowany zbiór, obejmujący 4 atrybuty wykonalności i 4 atrakcyjności, po wykonaniu dyskretyzacji globalnej składający się z jąder zbiorów, tj. dla $B = \{A_1, A_2, \dots, A_{13}\}$ $CORE(B) = \{A_1, A_2, A_3, A_9\}$ oraz dla $B = \{W_1, W_2, \dots, W_8\}$ $CORE(B) = \{W_1, W_2, W_3, W_7\}$. DEA zastosowana do zredukowanego zbioru kryteriów wskazała T16, T17, T20 i T21 jako technologie efektywne. Powyższe technologie są elementami zbiorów siedmiu najwyżżej ocenianych, wyłanianych za pomocą innych rozważanych metod dyskretyzacji (tabela 4.13).

Tabela 4.12. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane z uwzględnienia wiedzy) – atrybuty jądra i reduktów

	Dyskretyzacja lokalna do zbioru	Dyskretyzacja lokalna do zbioru	Dyskretyzacja lokalna do zbioru {0,1,2}	Dyskretyzacja lokalna do zbioru {0,1,2}	Dyskretyzacja lokalna do zbioru {0,1,2}	Dyskretyzacja globalna	Dyskretyzacja globalna
CORE	{W1, W2, W5, W7}	{A2}	{W1, W3, W5, W6, W7}	-	{W1, W2, W3, W7}	{A1, A2, A3, A9}	
RED	{W1, W2, W5, W7, W8} {W1, W2, W3, W5, W7}	14 reduktów	{W1, W3, W5, W6, W7}	104 redukty	{W1, W2, W3, W7}	{A1, A2, A3, A9}	
Atrybuty najczęściej występujące w reduktach	W1, W2, W5, W7	A2, A8, A5, A9, A11		A8, A4, A2, A3, A7			
Redukt wybrany	{W1, W2, W3, W5, W7}	{A2, A5, A8, A11}	{W1, W3, W5, W6, W7}	{A2, A3, A4, A5}	{W1, W2, W3, W7}	{A1, A2, A3, A9}	

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Tabela 4.13. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane z uwzględnieniem wiedzy) – rankingi metody DEA dla wybranych reduktów

Redukty	{W1,W2,W3,W5,W7}		{W1,W3,W5,W6,W7}		{W1,W2,W3,W7}	
	{A2,A5,A8,A11}		{A2,A3,A4,A5}		{A1,A2,A3,A9}	
Technologie 100% efektywne	T16, T17, T20, T21, T23, T24		T16, T17, T20, T21, T23 (0,993), T24		T16, T17, T20, T21, T23 (0,998), T24 (0,992)	
Ranking technologii	T20	1,095	T17	1,091	T20	1,095
	T17	1,091	T20	1,059	T17	1,091
	T23	1,050	T16	1,054	T16	1,054
	T21	1,041	T24	1,035	T21	1,021
	T16	1,037	T21	1,021	T23	0,998
	T24	1,028	T23	0,993	T24	0,992
	T31	0,986	T18	0,968	T4	0,959
	T33	0,973	T31	0,943	T31	0,941
	T18	0,968	T25	0,926	T33	0,937
	T4	0,959	T27	0,925	T25	0,934
	T25	0,940	T5	0,910	T5	0,928
	T5	0,926	T33	0,905	T8	0,926
	T8	0,926	T4	0,894	T18	0,912
	T3	0,892	T3	0,872	T3	0,891
	T26	0,887	T45	0,872	T27	0,886
	T27	0,882	T14	0,869	T9	0,879
	T9	0,879	T34	0,866	T45	0,869
	T34	0,878	T26	0,861	T14	0,863
	T45	0,867	T19	0,854	T12	0,855
	T14	0,861	T8	0,850	T42	0,850
	T42	0,856	T42	0,850	T34	0,845
	T12	0,855	T49	0,847	T36	0,837
	T36	0,849	T12	0,846	T44	0,836
	T19	0,844	T36	0,840	T40	0,835
	T11	0,840	T44	0,836	T19	0,834
	T1	0,838	T40	0,835	T30	0,834
	T30	0,834	T43	0,834	T13	0,833
	T22	0,833	T37	0,829	T15	0,828
T13	0,832	T15	0,828	T43	0,815	
T40	0,830	T13	0,824	T7	0,812	

Redukty	{W1,W2,W3,W5,W7}		{W1,W3,W5,W6,W7}		{W1,W2,W3,W7}	
	{A2,A5,A8,A11}		{A2,A3,A4,A5}		{A1,A2,A3,A9}	
Technologie 100% efektywne	T16, T17, T20, T21, T23, T24		T16, T17, T20, T21, T23 (0,993), T24		T16, T17, T20, T21, T23 (0,998), T24 (0,992)	
Ranking technologii	T37	0,825	T22	0,823	T49	0,812
	T44	0,813	T1	0,819	T51	0,807
	T7	0,812	T11	0,794	T11	0,802
	T51	0,807	T50	0,788	T35	0,800
	T32	0,805	T51	0,787	T22	0,797
	T43	0,805	T30	0,784	T26	0,788
	T35	0,800	T53	0,774	T6	0,786
	T6	0,786	T39	0,774	T1	0,785
	T15	0,784	T9	0,771	T50	0,781
	T10	0,778	T7	0,770	T10	0,778
	T39	0,772	T38	0,765	T39	0,774
	T28	0,772	T57	0,762	T57	0,768
	T57	0,770	T32	0,761	T32	0,763
	T38	0,769	T10	0,758	T28	0,762
	T49	0,767	T6	0,757	T53	0,761
	T46	0,757	T28	0,750	T46	0,757
	T48	0,742	T35	0,723	T48	0,743
	T47	0,717	T46	0,719	T47	0,717
	T53	0,714	T2	0,713	T38	0,714
	T50	0,713	T48	0,712	T37	0,696
	T2	0,712	T29	0,704	T29	0,653
	T29	0,704	T47	0,698	T54	0,653
	T54	0,643	T54	0,689	T2	0,632
	T41	0,621	T55	0,631	T41	0,618
	T56	0,608	T56	0,620	T56	0,610
	T55	0,547	T52	0,609	T52	0,603
T52	0,537	T41	0,599	T55	0,586	

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Zestawienie wyników priorytyzacji technologii metodą DEA zaimplementowaną dla zredukowanego zbioru kryteriów – dla danych ważonych wiedzą ekspercką oraz nieważonych – przedstawiono w tabeli 4.14 i zilustrowano na

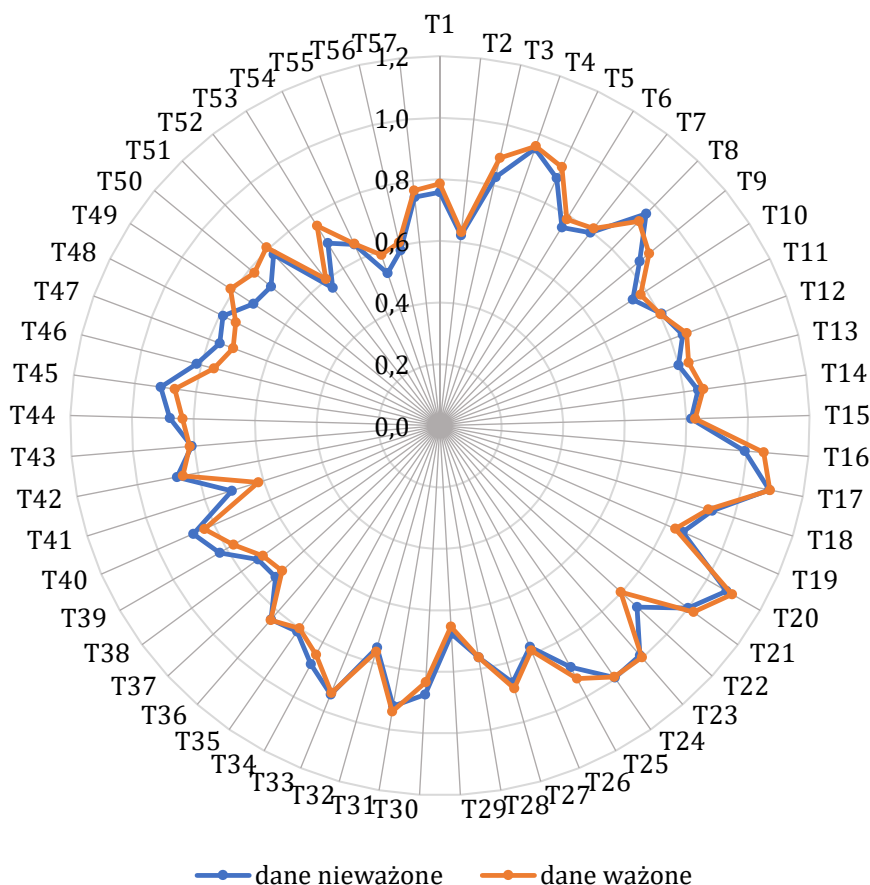
rysunku 4.5. Dla opracowanych rankingów współczynnik korelacji Spearmana wynosi 0,929, natomiast Kendalla 0,786.

Tabela 4.14. Technologie wskazywane jako efektywne dla zredukowanego zbioru danych ważonych wiedzą ekspercką i nieważonych

Nr	Technologia	DEA (dane nieważone)	Technologia	DEA (dane ważne)
1.	T17	1,089	T20	1,095
2.	T20	1,074	T17	1,091
3.	T21	0,999	T16	1,054
4.	T24	0,995	T21	1,021
5.	T16	0,993	T23	0,998
6.	T23	0,989	T24	0,992
7.	T8	0,960	T4	0,959
8.	T4	0,951	T31	0,941
9.	T33	0,942	T33	0,937
10.	T18	0,925	T25	0,934
11.	T31	0,923	T5	0,928
12.	T45	0,915	T8	0,926
13.	T25	0,891	T18	0,912
14.	T5	0,888	T3	0,891
15.	T34	0,881	T27	0,886
16.	T44	0,877	T9	0,879
17.	T30	0,874	T45	0,869
18.	T40	0,874	T14	0,863
19.	T42	0,870	T12	0,855
20.	T22	0,869	T42	0,850
21.	T27	0,866	T34	0,845
22.	T19	0,860	T36	0,837
23.	T14	0,846	T44	0,836
24.	T12	0,841	T40	0,835
25.	T9	0,839	T19	0,834
26.	T36	0,835	T30	0,834
27.	T3	0,827	T13	0,833
28.	T39	0,825	T15	0,828
29.	T15	0,816	T43	0,815

Nr	Technologia	DEA (dane nieważone)	Technologia	DEA (dane ważne)
30.	T46	0,815	T7	0,812
31.	T35	0,813	T49	0,812
32.	T43	0,809	T51	0,807
33.	T11	0,806	T11	0,802
34.	T13	0,799	T35	0,800
35.	T7	0,794	T22	0,797
36.	T48	0,789	T26	0,788
37.	T26	0,775	T6	0,786
38.	T51	0,775	T1	0,785
39.	T47	0,763	T50	0,781
40.	T28	0,762	T10	0,778
41.	T1	0,758	T39	0,774
42.	T6	0,755	T57	0,768
43.	T32	0,749	T32	0,763
44.	T10	0,748	T28	0,762
45.	T57	0,747	T53	0,761
46.	T38	0,733	T46	0,757
47.	T37	0,725	T48	0,743
48.	T49	0,724	T47	0,717
49.	T50	0,710	T38	0,714
50.	T41	0,708	T37	0,696
51.	T53	0,696	T29	0,653
52.	T29	0,677	T54	0,653
53.	T54	0,651	T2	0,632
54.	T2	0,622	T41	0,618
55.	T56	0,584	T56	0,610
56.	T52	0,567	T52	0,603
57.	T55	0,524	T55	0,586

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».



Rysunek 4.5. Wyniki metody DEA dla zredukowanego zbioru kryteriów z uwzględnieniem wiedzy eksperckiej i bez niej

Źródło: opracowanie własne danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Eliminacja redundancji występującej w zbiorze kryteriów oraz nadanie optymalnych dla każdej z technologii wag pozwala uprościć oraz zobiektywizować ocenę. Redukcja zbioru kryteriów tylko nieznacznie zmienia uporządkowanie rankingów opracowanych za pomocą metody DEA. Zgodność rankingów mierzoną korelacją Kendalla i Spearmana przedstawiono w tabelach 4.15 i 4.16.

Następnie za pomocą hybrydowego modelu priorytyzacji technologii uwzględniono niespójność ocen eksperckich. Występowanie dyspersji danych jest problemem, który w pewnym stopniu zignorowano w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020», licząc średnie arytmetyczne.

Tabela 4.15. Korelacja Kendalla dla rankingów wyznaczonych metodą DEA

	DEA zbiór zredukowany, dane nieważone	DEA zbiór zredukowany, dane ważne	DEA zbiór niezredukowany, dane nieważone	DEA zbiór niezredukowany, dane ważne
DEA zbiór zredukowany, dane nieważone	1,000			
DEA zbiór zredukowany, dane ważne	0,786	1,000		
DEA zbiór niezredukowany, dane ważne	0,741	0,677	1,000	
DEA zbiór niezredukowany, dane nieważone	0,749	0,640	0,603	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną oznaczono korelacje istotne z $p < 0,05$.

Tabela 4.16. Korelacja Spearmana dla rankingów wyznaczonych metodą DEA

	DEA zbiór zredukowany, dane nieważone	DEA zbiór zredukowany, dane ważne	DEA zbiór niezredukowany, dane nieważone	DEA zbiór niezredukowany, dane ważne
DEA zbiór zredukowany, dane nieważone	1,000			
DEA zbiór zredukowany, dane ważne	0,929	1,000		
DEA zbiór niezredukowany, dane ważne	0,893	0,849	1,000	
DEA zbiór niezredukowany, dane nieważone	0,885	0,825	0,779	1,000

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu. Czcionką pogrubioną oznaczono korelacje istotne z $p < 0,05$.

Zgodność odpowiedzi ekspertów projektu sprawdzono nominalnym współczynnikiem dyspersji. Obliczone dla odpowiedzi ekspertów wartości zamieszczono w tabelach 4.17 i 4.18. Znaczące różnice występujące w odpowiedziach, od prawie całkowitej zgodności do skrajnie różnych, znalazły odbicie w szerokim zakresie zmienności: od 0,35 do 0,98 ze średnią 0,82 dla kryteriów atrakcyjności i od 0,35 do 0,95 i średnią 0,8 dla kryteriów wykonalności.

Tabela 4.17. Nominalny współczynnik dyspersji dla kryteriów atrakcyjności

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
T1	0,838	0,880	0,966	0,810	0,838	0,838	0,769	0,658	0,817	0,762	0,914	0,921	0,907
T2	0,900	0,907	0,973	0,762	0,907	0,900	0,845	0,803	0,866	0,852	0,914	0,900	0,907
T3	0,824	0,914	0,973	0,907	0,817	0,907	0,762	0,824	0,949	0,824	0,880	0,900	0,942
T4	0,609	0,755	0,841	0,693	0,727	0,824	0,533	0,769	0,755	0,596	0,817	0,838	0,893
T5	0,734	0,727	0,755	0,907	0,880	0,824	0,803	0,769	0,914	0,873	0,886	0,893	0,866
T6	0,803	0,886	0,873	0,921	0,880	0,859	0,838	0,789	0,921	0,900	0,928	0,907	0,741
T7	0,852	0,900	0,873	0,935	0,907	0,859	0,845	0,824	0,921	0,852	0,914	0,949	0,845
T8	0,838	0,783	0,720	0,824	0,824	0,831	0,845	0,769	0,748	0,748	0,859	0,893	0,789
T9	0,873	0,845	0,845	0,976	0,852	0,893	0,831	0,824	0,810	0,810	0,921	0,900	0,907
T10	0,824	0,824	0,789	0,893	0,824	0,873	0,893	0,810	0,866	0,873	0,928	0,893	0,873
T11	0,824	0,838	0,789	0,900	0,789	0,789	0,886	0,817	0,796	0,852	0,886	0,893	0,789
T12	0,845	0,783	0,789	0,880	0,824	0,866	0,859	0,824	0,824	0,873	0,873	0,866	0,828
T13	0,907	0,873	0,866	0,873	0,866	0,838	0,935	0,838	0,873	0,907	0,935	0,852	0,935
T14	0,796	0,921	0,803	0,935	0,838	0,810	0,852	0,866	0,921	0,866	0,921	0,838	0,789
T15	0,789	0,900	0,755	0,866	0,873	0,789	0,852	0,762	0,921	0,810	0,928	0,907	0,824
T16	0,783	0,880	0,838	0,907	0,893	0,824	0,852	0,921	0,880	0,859	0,949	0,893	0,838
T17	0,533	0,734	0,623	0,616	0,727	0,789	0,602	0,748	0,741	0,783	0,866	0,907	0,796
T18	0,727	0,838	0,824	0,859	0,803	0,803	0,824	0,824	0,810	0,824	0,935	0,907	0,796
T19	0,783	0,859	0,845	0,900	0,852	0,907	0,845	0,873	0,866	0,880	0,928	0,949	0,880
T20	0,596	0,789	0,353	0,686	0,727	0,824	0,623	0,845	0,859	0,755	0,921	0,880	0,796
T21	0,748	0,796	0,450	0,616	0,783	0,852	0,616	0,852	0,762	0,769	0,921	0,880	0,769
T22	0,679	0,727	0,699	0,866	0,783	0,886	0,748	0,900	0,762	0,907	0,845	0,928	0,880
T23	0,512	0,796	0,609	0,665	0,623	0,783	0,658	0,741	0,720	0,789	0,810	0,658	0,658
T24	0,485	0,699	0,623	0,720	0,609	0,838	0,699	0,720	0,762	0,866	0,776	0,741	0,658
T25	0,783	0,762	0,679	0,866	0,796	0,803	0,845	0,762	0,873	0,866	0,824	0,762	0,769
T26	0,748	0,824	0,720	0,720	0,727	0,727	0,734	0,789	0,845	0,693	0,734	0,866	0,762
T27	0,713	0,727	0,623	0,693	0,824	0,810	0,769	0,616	0,783	0,741	0,810	0,810	0,824
T28	0,769	0,845	0,803	0,789	0,810	0,873	0,789	0,789	0,900	0,893	0,852	0,852	0,824

T29	0,665	0,741	0,762	0,693	0,755	0,824	0,817	0,658	0,762	0,845	0,838	0,893
T30	0,727	0,741	0,727	0,727	0,699	0,866	0,866	0,526	0,859	0,741	0,789	0,866
T31	0,679	0,699	0,748	0,727	0,734	0,810	0,713	0,769	0,789	0,824	0,762	0,862
T32	0,845	0,893	0,817	0,928	0,810	0,907	0,935	0,866	0,907	0,893	0,956	0,866
T33	0,623	0,679	0,679	0,810	0,838	0,686	0,602	0,713	0,886	0,727	0,886	0,699
T34	0,686	0,679	0,769	0,838	0,824	0,852	0,845	0,817	0,893	0,859	0,935	0,720
T35	0,755	0,866	0,866	0,817	0,845	0,935	0,935	0,845	0,838	0,893	0,907	0,783
T36	0,623	0,741	0,769	0,734	0,824	0,679	0,893	0,824	0,886	0,845	0,699	0,734
T37	0,866	0,942	0,817	0,720	0,873	0,824	0,824	0,755	0,921	0,893	0,900	0,824
T38	0,824	0,873	0,755	0,845	0,547	0,873	0,789	0,699	0,810	0,838	0,866	0,866
T39	0,741	0,796	0,783	0,789	0,810	0,810	0,665	0,824	0,803	0,810	0,928	0,727
T40	0,866	0,900	0,817	0,817	0,921	0,783	0,783	0,810	0,789	0,866	0,935	0,720
T41	0,900	0,866	0,845	0,762	0,866	0,810	0,852	0,824	0,845	0,866	0,949	0,845
T42	0,748	0,838	0,810	0,679	0,755	0,824	0,741	0,873	0,803	0,810	0,921	0,651
T43	0,845	0,824	0,741	0,734	0,880	0,810	0,796	0,866	0,762	0,810	0,893	0,623
T44	0,727	0,824	0,658	0,623	0,852	0,693	0,748	0,873	0,734	0,741	0,873	0,734
T45	0,596	0,762	0,616	0,658	0,900	0,720	0,596	0,866	0,762	0,762	0,852	0,658
T46	0,803	0,838	0,783	0,907	0,928	0,852	0,824	0,880	0,852	0,866	0,928	0,824
T47	0,886	0,866	0,880	0,928	0,873	0,907	0,907	0,914	0,810	0,880	0,900	0,845
T48	0,921	0,928	0,907	0,970	0,907	0,900	0,921	0,935	0,824	0,900	0,893	0,893
T49	0,783	0,789	0,789	0,866	0,866	0,845	0,852	0,873	0,817	0,845	0,886	0,883
T50	0,852	0,824	0,866	0,866	0,900	0,914	0,907	0,907	0,720	0,796	0,789	0,859
T51	0,893	0,824	0,852	0,866	0,907	0,873	0,921	0,956	0,824	0,921	0,893	0,838
T52	0,886	0,852	0,866	0,734	0,907	0,866	0,866	0,817	0,720	0,789	0,803	0,852
T53	0,824	0,866	0,616	0,769	0,921	0,679	0,783	0,734	0,845	0,810	0,789	0,886
T54	0,880	0,880	0,824	0,845	0,935	0,893	0,866	0,859	0,741	0,824	0,831	0,810
T55	0,914	0,845	0,852	0,866	0,907	0,921	0,845	0,817	0,817	0,852	0,866	0,803
T56	0,824	0,824	0,928	0,900	0,866	0,935	0,914	0,789	0,886	0,893	0,852	0,845
T57	0,679	0,679	0,776	0,845	0,803	0,845	0,789	0,880	0,817	0,921	0,720	0,866

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

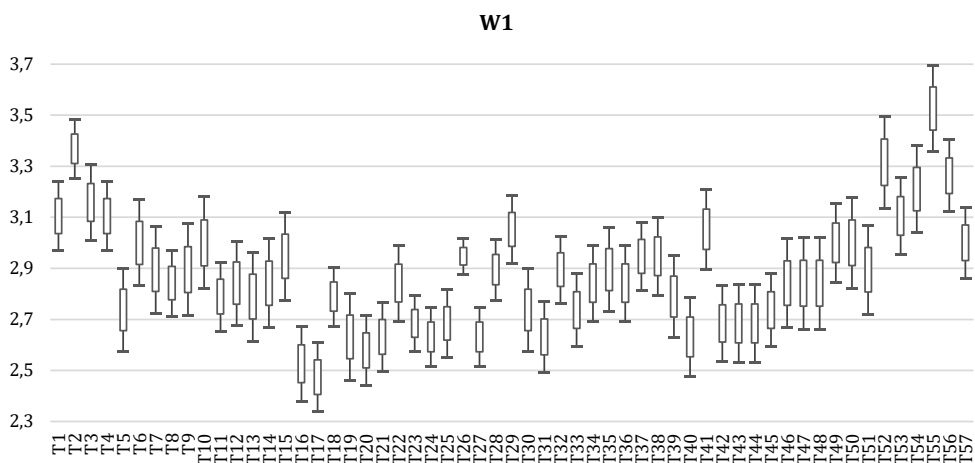
Tabela 4.18. Nominalny współczynnik dyspersji dla kryteriów wykonalności

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T1	0,686	0,755	0,845	0,741	0,859	0,803	0,873	0,907
T2	0,575	0,658	0,866	0,803	0,893	0,893	0,789	0,845
T3	0,741	0,727	0,824	0,886	0,873	0,893	0,873	0,914
T4	0,686	0,734	0,776	0,824	0,859	0,886	0,845	0,796
T5	0,810	0,693	0,789	0,824	0,852	0,783	0,900	0,796
T6	0,845	0,762	0,866	0,824	0,824	0,783	0,886	0,852
T7	0,852	0,713	0,789	0,824	0,845	0,789	0,893	0,824
T8	0,651	0,623	0,609	0,762	0,783	0,693	0,831	0,824
T9	0,900	0,810	0,893	0,886	0,873	0,817	0,921	0,866
T10	0,900	0,880	0,866	0,845	0,845	0,789	0,873	0,852
T11	0,679	0,602	0,783	0,596	0,748	0,734	0,873	0,845
T12	0,824	0,713	0,873	0,762	0,810	0,783	0,810	0,845
T13	0,873	0,852	0,907	0,783	0,845	0,789	0,873	0,852
T14	0,866	0,852	0,866	0,866	0,866	0,852	0,886	0,831
T15	0,866	0,852	0,845	0,900	0,900	0,783	0,783	0,693
T16	0,741	0,783	0,762	0,852	0,886	0,873	0,942	0,824
T17	0,679	0,693	0,658	0,623	0,734	0,783	0,859	0,679
T18	0,575	0,575	0,734	0,803	0,789	0,803	0,886	0,789
T19	0,859	0,769	0,789	0,859	0,886	0,873	0,852	0,789
T20	0,686	0,783	0,845	0,769	0,762	0,776	0,810	0,852
T21	0,679	0,783	0,810	0,824	0,762	0,769	0,783	0,845
T22	0,741	0,727	0,741	0,762	0,907	0,831	0,935	0,921
T23	0,540	0,741	0,623	0,810	0,748	0,893	0,720	0,838
T24	0,582	0,727	0,623	0,769	0,776	0,810	0,776	0,679
T25	0,658	0,783	0,679	0,810	0,866	0,880	0,769	0,859
T26	0,346	0,526	0,693	0,845	0,810	0,686	0,679	0,699
T27	0,582	0,651	0,720	0,845	0,866	0,866	0,727	0,748
T28	0,596	0,762	0,762	0,845	0,880	0,866	0,880	0,817
T29	0,665	0,665	0,665	0,810	0,824	0,789	0,838	0,776
T30	0,810	0,810	0,873	0,769	0,824	0,769	0,866	0,817
T31	0,699	0,741	0,658	0,907	0,893	0,880	0,852	0,658
T32	0,658	0,602	0,803	0,845	0,769	0,762	0,907	0,783
T33	0,720	0,734	0,769	0,845	0,900	0,852	0,755	0,789

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T34	0,748	0,665	0,713	0,824	0,900	0,893	0,852	0,866
T35	0,824	0,762	0,803	0,866	0,907	0,866	0,789	0,866
T36	0,748	0,789	0,817	0,866	0,893	0,866	0,803	0,824
T37	0,665	0,602	0,734	0,824	0,866	0,810	0,789	0,824
T38	0,762	0,720	0,713	0,907	0,942	0,866	0,893	0,852
T39	0,803	0,769	0,769	0,783	0,845	0,686	0,897	0,831
T40	0,783	0,665	0,803	0,810	0,866	0,824	0,803	0,866
T41	0,789	0,803	0,824	0,880	0,907	0,907	0,893	0,873
T42	0,734	0,693	0,720	0,824	0,880	0,845	0,824	0,713
T43	0,762	0,713	0,720	0,789	0,838	0,783	0,866	0,831
T44	0,762	0,623	0,651	0,741	0,845	0,824	0,852	0,803
T45	0,720	0,693	0,734	0,866	0,907	0,873	0,866	0,744
T46	0,873	0,866	0,845	0,852	0,873	0,783	0,824	0,817
T47	0,900	0,866	0,803	0,886	0,893	0,866	0,900	0,824
T48	0,900	0,873	0,852	0,824	0,907	0,859	0,866	0,866
T49	0,776	0,699	0,810	0,893	0,866	0,852	0,880	0,450
T50	0,893	0,783	0,845	0,907	0,880	0,852	0,866	0,727
T51	0,873	0,769	0,866	0,893	0,824	0,893	0,907	0,755
T52	0,907	0,838	0,783	0,921	0,907	0,845	0,803	0,783
T53	0,755	0,741	0,658	0,727	0,817	0,838	0,935	0,824
T54	0,852	0,859	0,783	0,914	0,921	0,893	0,845	0,859
T55	0,845	0,762	0,824	0,907	0,928	0,921	0,866	0,921
T56	0,699	0,665	0,803	0,838	0,893	0,817	0,873	0,928
T57	0,699	0,803	0,713	0,755	0,748	0,748	0,686	0,783

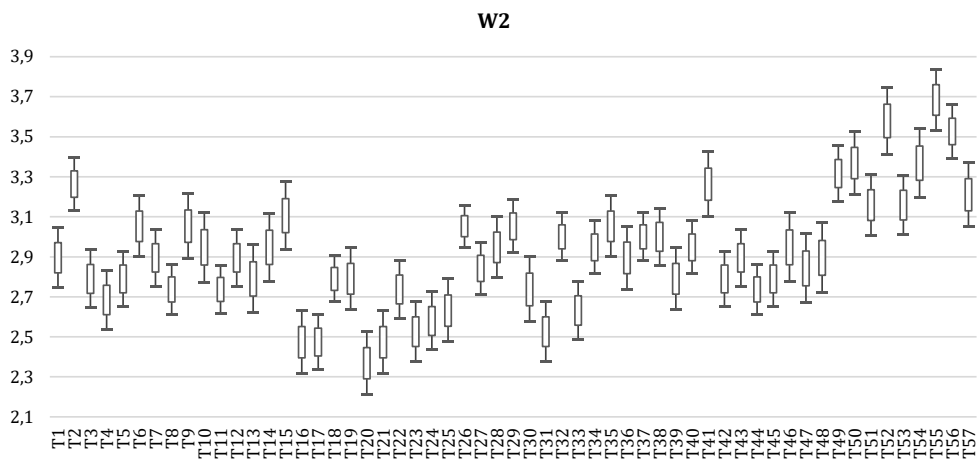
Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».

Wykorzystując współczynnik dyspersji, oszacowano przybliżenia zmiennych, a następnie zaimplementowano dla nich model DEA. Do zaprojektowania zakresu charakterystyki dla każdej z technologii (dolnego i górnego przybliżenia) wykorzystano wskaźnik dyspersji – h . Arbitralnie przyjęto $\pm 20\%h$ oraz $\pm 10\%h$, oddając relację: im mniej spójne są odpowiedzi, tym szerszy jest przedział. Otrzymane przedziały dla danych nieważonych zilustrowano na wykresach na rysunkach 4.6 – 4.9 (kryteria wykonalności) oraz 4.10 – 4.12 (kryteria atrakcyjności). Zwraca uwagę pewne pokrywanie się opinii w przyjętych kryteriach dla poszczególnych technologii, szczególnie dla kryteriów wykonalności.



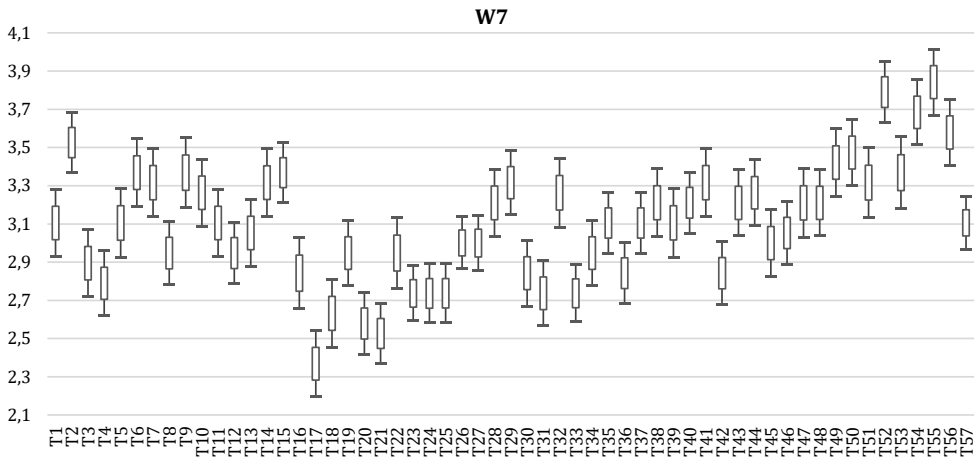
Rysunek 4.6. Górne i dolne przybliżenie kryterium W1 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



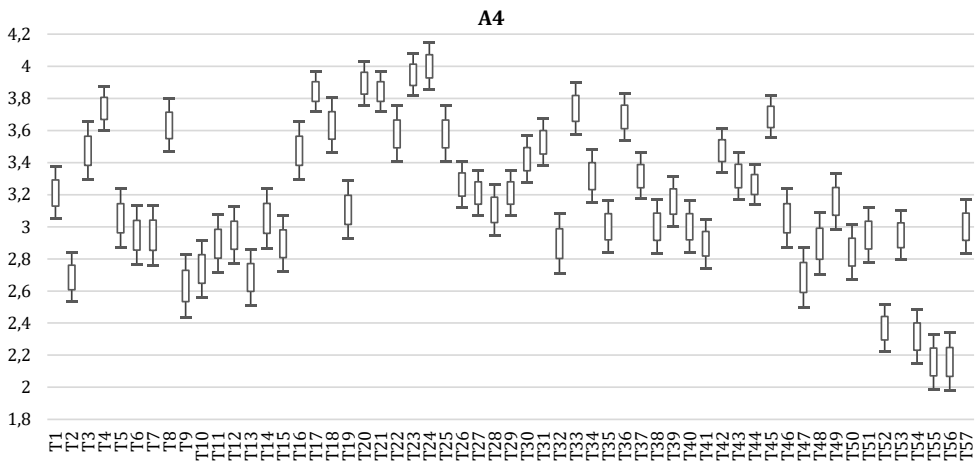
Rysunek 4.7. Górne i dolne przybliżenie kryterium W2 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



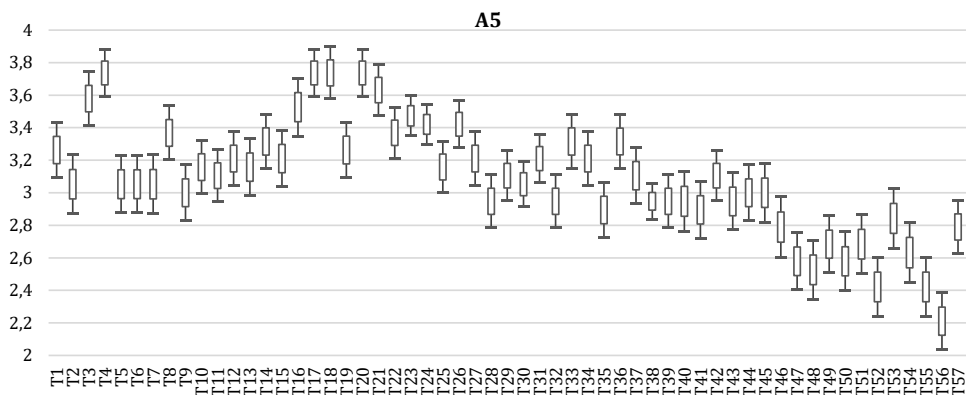
Rysunek 4.8. Górne i dolne przybliżenie kryterium W7 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



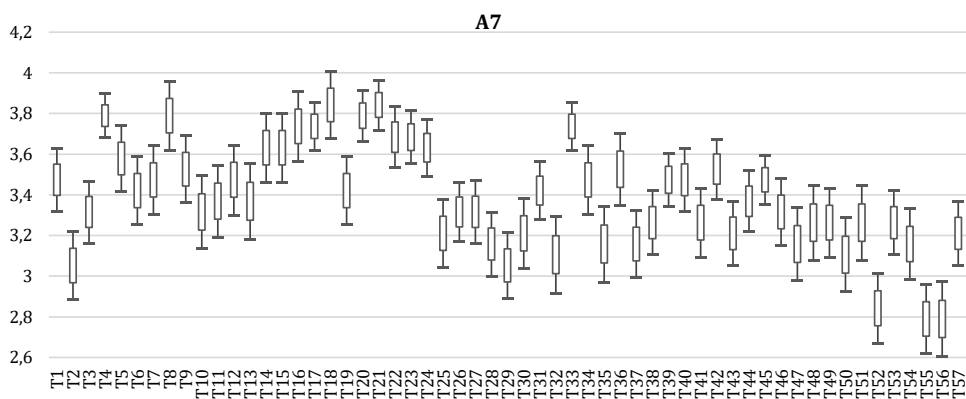
Rysunek 4.9. Górne i dolne przybliżenie kryterium A4 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



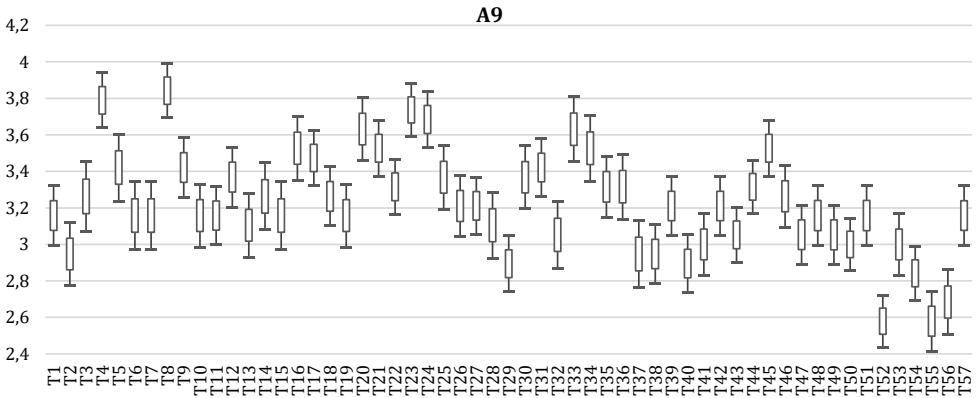
Rysunek 4.10. Górne i dolne przybliżenie kryterium A5 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.11. Górne i dolne przybliżenie kryterium A7 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.12. Górne i dolne przybliżenie kryterium A9 (dane nieważone)

Źródło: opracowanie własne.

Obliczenia z zastosowaniem zaproponowanego hybrydowego modelu SE-DEA przeprowadzono dla subiektywnie przyjętych wartości $\alpha=0,5$, $\alpha=0,6$ oraz $\alpha=0,8$. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 4.19 i zilustrowano na wykresie na rysunku 4.13.

Tabela 4.19. Wyniki hybrydowego modelu przy różnych poziomach zaufania (dane nieważone)

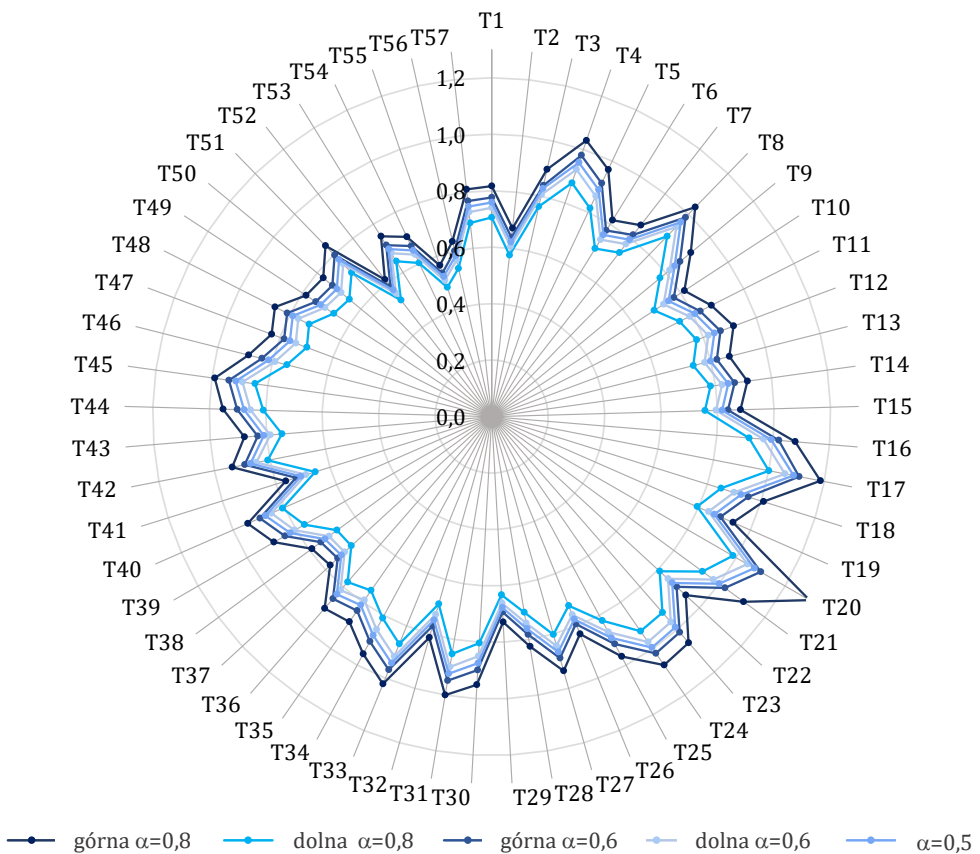
	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$		$\alpha=0,8$	
		dolna	górna	dolna	górna
T1	0,758	0,740	0,776	0,705	0,816
T2	0,622	0,606	0,638	0,575	0,671
T3	0,827	0,805	0,839	0,762	0,897
T4	0,951	0,925	0,978	0,875	1,034
T5	0,888	0,863	0,913	0,816	0,967
T6	0,755	0,736	0,774	0,699	0,816
T7	0,794	0,774	0,815	0,736	0,859
T8	0,960	0,937	0,984	0,891	1,034
T9	0,839	0,816	0,863	0,772	0,913
T10	0,748	0,727	0,770	0,687	0,815
T11	0,806	0,785	0,827	0,746	0,871
T12	0,842	0,819	0,865	0,775	0,914
T13	0,799	0,778	0,822	0,736	0,868
T14	0,846	0,824	0,868	0,782	0,914
T15	0,816	0,795	0,837	0,755	0,881

4. WERYFIKACJA HYBRYDOWEGO MODELU PRIORYTYZACJI TECHNOLOGII...

	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$		$\alpha=0,8$	
		dolna	górną	dolna	górną
T16	0,993	0,966	1,020	0,914	1,078
T17	1,089	1,058	1,109	1,000	1,186
T18	0,925	0,899	0,952	0,851	1,008
T19	0,861	0,838	0,884	0,794	0,933
T20	1,074	1,045	1,100	0,986	1,300
T21	0,999	0,974	1,025	0,926	1,107
T22	0,869	0,848	0,890	0,808	0,934
T23	0,989	0,965	1,013	0,920	1,062
T24	0,995	0,971	1,020	0,925	1,071
T25	0,891	0,868	0,915	0,822	0,966
T26	0,775	0,758	0,793	0,723	0,831
T27	0,866	0,844	0,889	0,802	0,936
T28	0,762	0,742	0,782	0,703	0,825
T29	0,677	0,662	0,693	0,632	0,729
T30	0,874	0,850	0,899	0,803	0,951
T31	0,923	0,899	0,948	0,852	1,000
T32	0,749	0,729	0,770	0,690	0,813
T33	0,942	0,917	0,968	0,869	1,022
T34	0,881	0,857	0,905	0,812	0,956
T35	0,813	0,791	0,836	0,749	0,884
T36	0,835	0,815	0,855	0,777	0,901
T37	0,724	0,708	0,741	0,675	0,777
T38	0,733	0,715	0,751	0,680	0,790
T39	0,824	0,805	0,845	0,766	0,890
T40	0,874	0,852	0,896	0,809	0,943
T41	0,708	0,690	0,726	0,655	0,764
T42	0,870	0,849	0,891	0,808	0,936
T43	0,809	0,787	0,831	0,745	0,878
T44	0,877	0,854	0,901	0,809	0,951
T45	0,915	0,891	0,939	0,846	0,990
T46	0,815	0,792	0,839	0,748	0,888
T47	0,763	0,741	0,785	0,699	0,832
T48	0,789	0,767	0,812	0,724	0,860
T49	0,724	0,705	0,744	0,668	0,785

	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$		$\alpha=0,8$	
		dolna	górna	dolna	górna
T50	0,710	0,691	0,730	0,653	0,772
T51	0,775	0,753	0,797	0,711	0,844
T52	0,567	0,552	0,583	0,523	0,615
T53	0,696	0,679	0,713	0,646	0,749
T54	0,651	0,634	0,668	0,602	0,704
T55	0,524	0,510	0,537	0,484	0,566
T56	0,584	0,568	0,601	0,537	0,635
T57	0,748	0,728	0,768	0,690	0,809

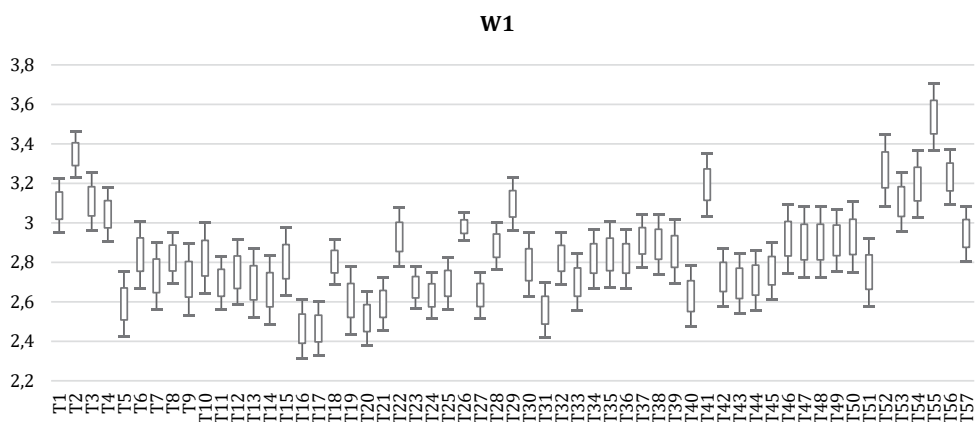
Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».



Rysunek 4.13. Ilustracja obliczeń z zastosowaniem modelu SE-DEA dla zmiennych przybliżonych – dane nieważone, $\alpha=0,5$, $\alpha=0,6$, $\alpha=0,8$

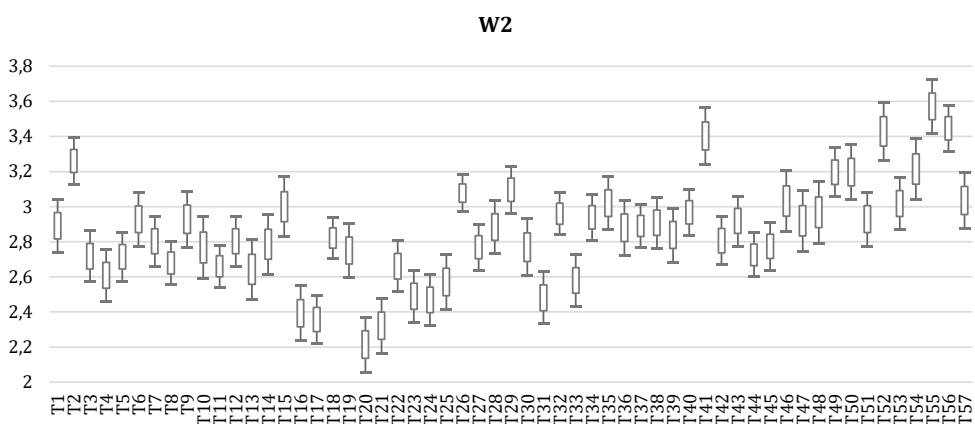
Źródło: opracowanie własne.

Analogiczną procedurę zaimplementowano dla danych ważonych wiedzą ekspercką. W tym wypadku w hybrydowym modelu ujęto następujące kryteria wykonalności: W1, W2, W3, W7 oraz atrakcyjności: A1, A2, A3, A9. Opracowane przedziały zilustrowano na wykresach na rysunkach 4.14 – 4.21. Natomiast wyniki hybrydowego modelu dla danych ważonych ujęto w tabeli 4.20 i na rysunku 4.22. Analiza przedstawionych wykresów ilustruje, że tylko w wypadku niektórych technologii i kryteriów zgodność opinii ekspertów jest wysoka, np. W1: T26; W2: T18, T26; A1: T17, T23, T24; A3: T20, T21.



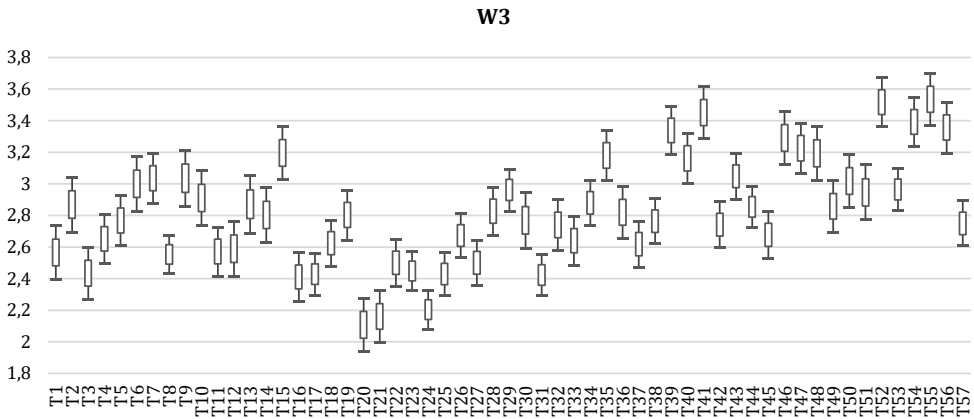
Rysunek 4.14. Górne i dolne przybliżenie kryterium W1 (dane ważne)

Źródło: opracowanie własne.



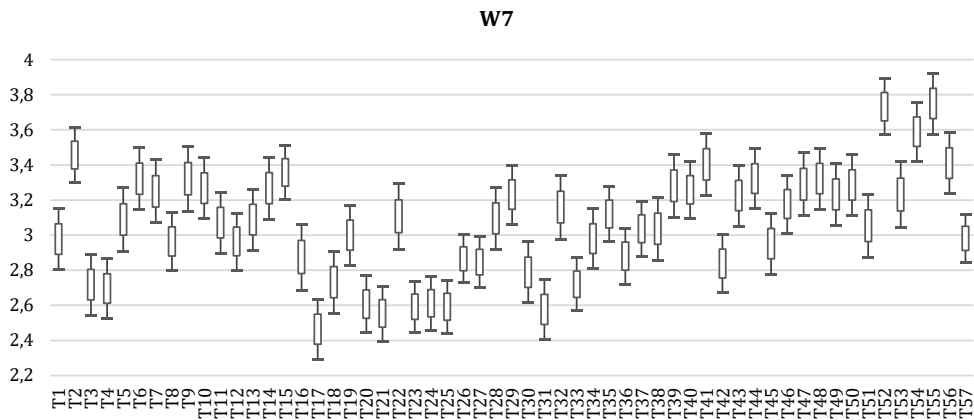
Rysunek 4.15. Górne i dolne przybliżenie kryterium W2 (dane ważne)

Źródło: opracowanie własne.



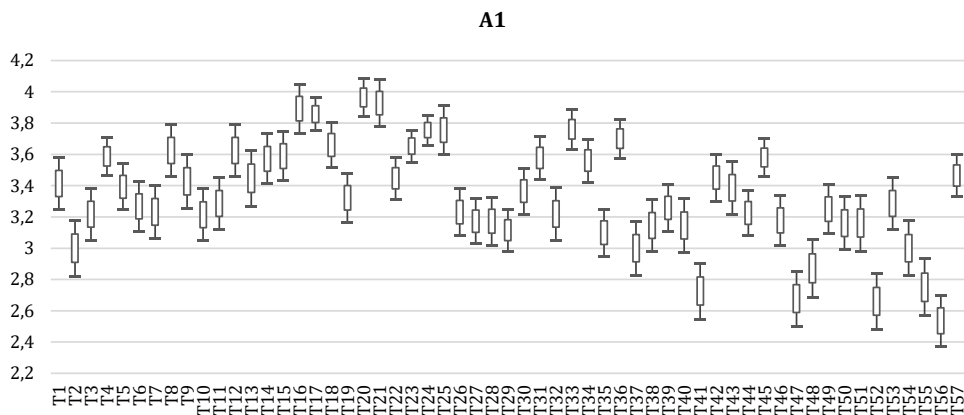
Rysunek 4.16. Górne i dolne przybliżenie kryterium W3 (dane ważone)

Źródło: opracowanie własne.



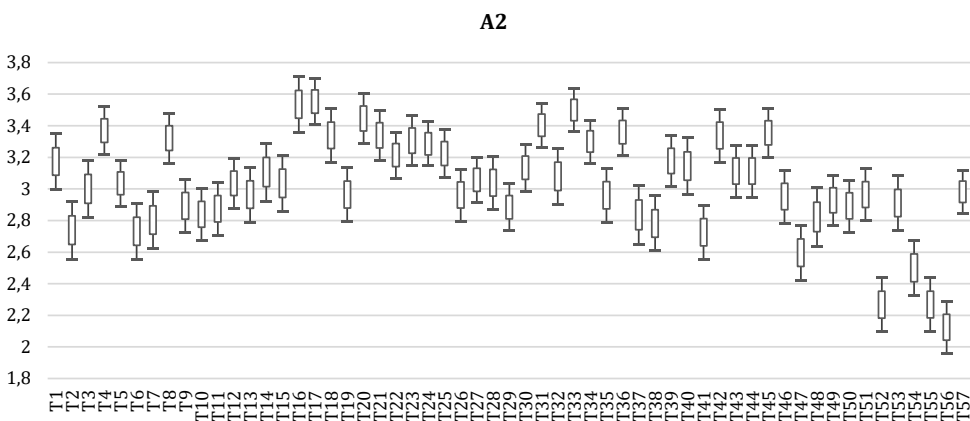
Rysunek 4.17. Górne i dolne przybliżenie kryterium W7 (dane ważone)

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.18. Górne i dolne przybliżenie kryterium A1 (dane ważone)

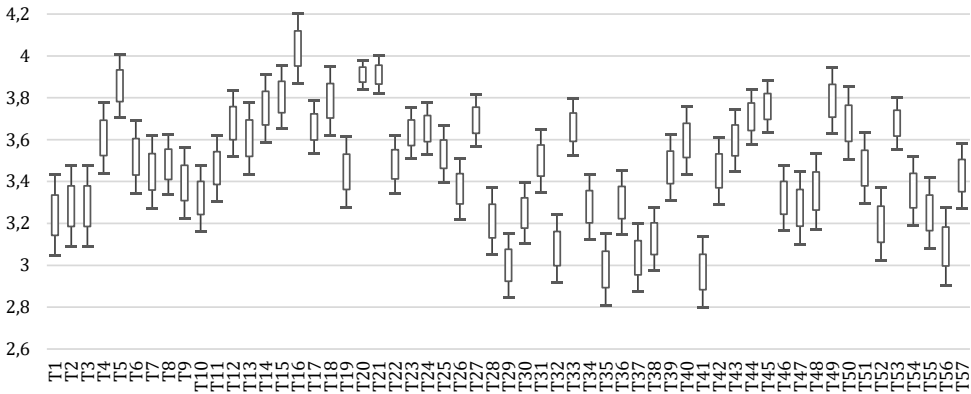
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.19. Górne i dolne przybliżenie kryterium A2 (dane ważone)

Źródło: opracowanie własne.

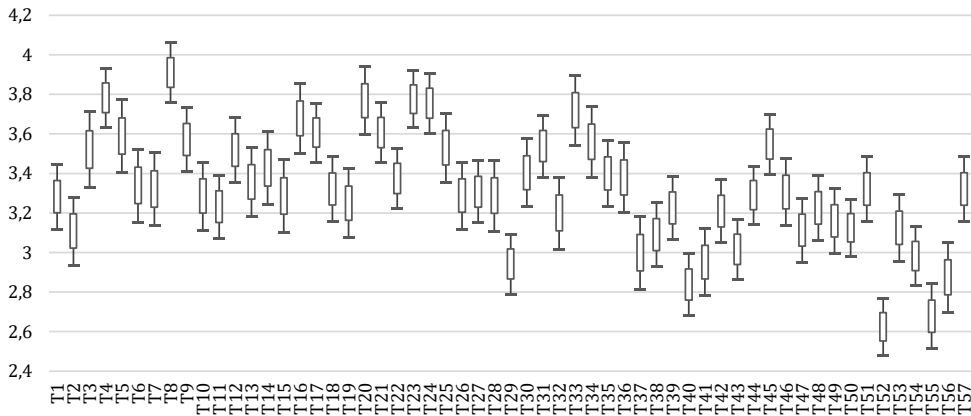
A3



Rysunek 4.20. Górne i dolne przybliżenie kryterium A3 (dane ważone)

Źródło: opracowanie własne.

A9



Rysunek 4.21. Górne i dolne przybliżenie kryterium A9 (dane ważone)

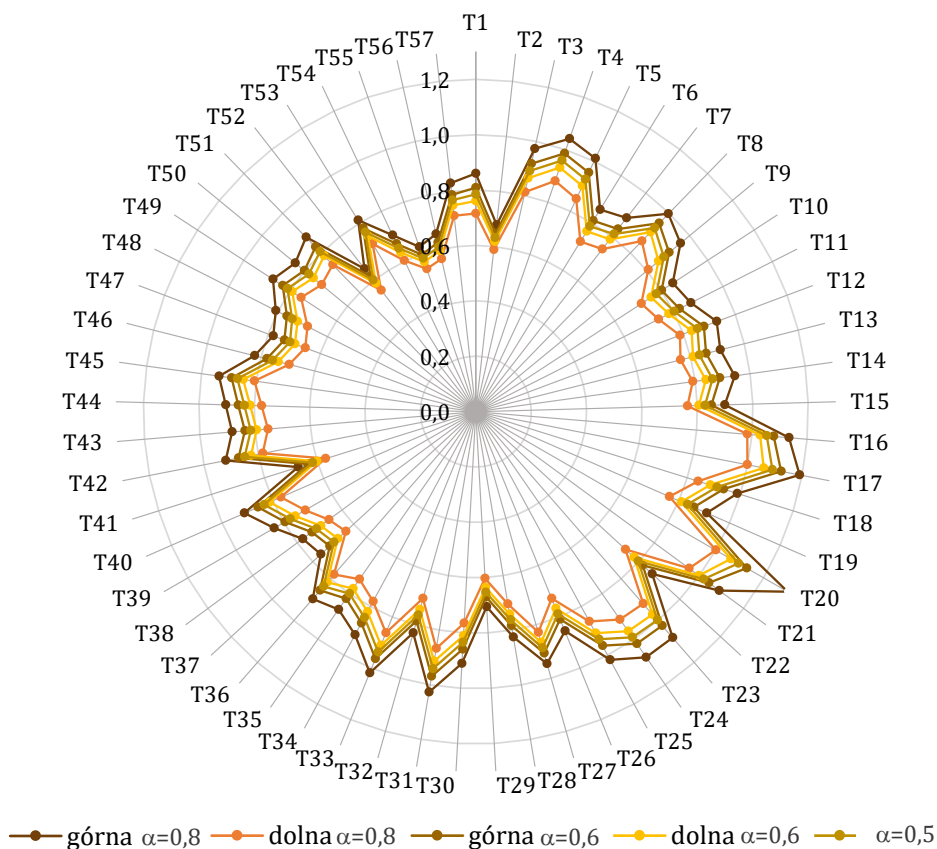
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.20. Wyniki hybrydowego modelu przy różnych poziomach zaufania (dane ważone)

	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$		$\alpha=0,8$	
		dolna	górna	dolna	górna
T1	0,785	0,761	0,809	0,716	0,860
T2	0,778	0,618	0,647	0,589	0,679
T3	0,802	0,864	0,918	0,813	0,973
T4	0,855	0,932	0,986	0,881	1,042
T5	0,833	0,901	0,955	0,850	1,011
T6	0,863	0,764	0,809	0,721	0,857
T7	0,828	0,789	0,836	0,744	0,886
T8	1,054	0,904	0,949	0,860	0,997
T9	1,091	0,855	0,904	0,807	0,957
T10	0,912	0,756	0,801	0,713	0,849
T11	0,834	0,781	0,824	0,739	0,870
T12	0,632	0,832	0,879	0,787	0,929
T13	1,095	0,809	0,858	0,762	0,910
T14	1,021	0,838	0,889	0,791	0,944
T15	0,797	0,806	0,851	0,764	0,899
T16	0,998	1,030	1,079	0,983	1,135
T17	0,992	1,059	1,123	0,999	1,191
T18	0,934	0,887	0,937	0,841	0,989
T19	0,788	0,810	0,859	0,763	0,910
T20	0,886	1,063	1,129	1,000	1,300
T21	0,762	0,999	1,044	0,956	1,091
T22	0,653	0,776	0,819	0,734	0,865
T23	0,891	0,971	1,025	0,920	1,082
T24	0,834	0,965	1,020	0,913	1,079
T25	0,941	0,909	0,961	0,861	1,019
T26	0,763	0,767	0,809	0,728	0,855
T27	0,937	0,866	0,906	0,828	0,946
T28	0,845	0,742	0,783	0,704	0,825
T29	0,800	0,636	0,670	0,603	0,705
T30	0,837	0,810	0,859	0,765	0,911
T31	0,696	0,914	0,969	0,867	1,027
T32	0,714	0,742	0,785	0,701	0,830

	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$		$\alpha=0,8$	
		dolna	górna	dolna	górna
T33	0,774	0,911	0,963	0,862	1,018
T34	0,959	0,822	0,868	0,779	0,916
T35	0,835	0,778	0,822	0,736	0,869
T36	0,618	0,817	0,856	0,780	0,897
T37	0,850	0,677	0,717	0,638	0,760
T38	0,815	0,695	0,734	0,658	0,776
T39	0,836	0,753	0,796	0,711	0,841
T40	0,869	0,813	0,859	0,769	0,912
T41	0,757	0,601	0,635	0,568	0,672
T42	0,717	0,827	0,873	0,784	0,920
T43	0,743	0,794	0,837	0,753	0,883
T44	0,812	0,815	0,858	0,774	0,903
T45	0,928	0,848	0,890	0,807	0,936
T46	0,781	0,736	0,778	0,695	0,824
T47	0,807	0,697	0,738	0,657	0,781
T48	0,603	0,722	0,764	0,681	0,809
T49	0,761	0,792	0,833	0,753	0,875
T50	0,653	0,760	0,802	0,721	0,845
T51	0,586	0,785	0,830	0,741	0,879
T52	0,610	0,587	0,620	0,556	0,654
T53	0,768	0,744	0,777	0,712	0,812
T54	0,786	0,636	0,670	0,604	0,705
T55	0,812	0,572	0,600	0,545	0,629
T56	0,926	0,595	0,626	0,566	0,657
T57	0,879	0,749	0,788	0,712	0,830

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020».



Rysunek 4.22. Ilustracja obliczeń z użyciem modelu SE-DEA dla zmiennych przybliżonych – dane ważone, $\alpha=0,5$, $\alpha=0,6$, $\alpha=0,8$

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowując przedstawiony przykład, w porównaniu do zastosowanej w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» metody kluczowych technologii bazującej na sumie i średniej algebraicznej kryteriów atrakcyjności i wykonalności, można wyróżnić następujące korzyści z zastosowania hybrydowego modelu priorytyzacji technologii:

1. Poprzez wykorzystanie pochodzącej z teorii zbiorów przybliżonych metody wyznaczania reduktów znacząco zmniejsza się liczbę rozważanych kryteriów. W projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» pierwotnie wygenerowany zbiór 21 atrybutów atrakcyjności i wykonalności został trzykrotnie ograniczony do odpowiednio: 7 w wypadku danych nieważonych i 8 dla danych ważonych wiedzą ekspercką. Upraszcza się tym samym interpretację końcowej oceny technologii, determinując ją wartościami tylko kilku zmiennych. Jednocze-

śnie, jak sprawdzono empirycznie, przeprowadzona redukcja nie wpływa istotnie na pozycje rankingowe technologii wyznaczone metodą DEA.

2. Zastosowanie metody DEA nadaje obiektywne wagi kryteriom oceny technologii. Indywidualne dopasowanie wag pozwala zaakcentować specyficzne cechy technologii i podkreślić ich „mocne strony”, tzn. przypisać kryteriom, w których technologia uzyskała najwyższe noty, odpowiednio możliwie najwyższe wagi w wypadku kryteriów atrakcyjności oraz możliwie najniższe dla kryteriów wykonalności. Tym samym eliminuje się dowolność i arbitralność wag uwzględnianych kryteriów.
3. Integracja metody DEA z koncepcją zmiennej przybliżonej pozwala na uwzględnienie możliwej sprzeczności wśród opinii eksperckich. Wynik priorytetyzacji technologii w postaci przedziałowej oceny, ujmujący rozbieżności uzyskanych ocen technologii, może być podstawą do formułowania alternatywnych wyważonych rekomendacji oraz tworzenia uzupełniających się scenariuszy. Zastosowanie zakresów i poziomów ufności relatywyzuje ocenę technologii.

Zdaniem autorki pozwala to przyjąć, że weryfikacja, rozumiana jako jakościowe sprawdzenie przydatności⁴⁵⁷ proponowanego hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii, wypadła pozytywnie. Zastosowanie hybrydowego modelu priorytetyzacji uzasadnia wybór technologii bardziej racjonalnie i obiektywnie. W projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» hybrydowy model priorytetyzacji technologii mógłby zostać zaimplementowany zamiast wybranego wariantu metody kluczowych technologii, aby zwiększyć jakość, a tym samym zaufanie do rezultatów selekcji priorytetowych technologii.

W celu weryfikacji autorka przeprowadziła obliczenia zaproponowanym hybrydowym modelem priorytetyzacji na podstawie wybranego zbioru technologii, którym był rozpatrywany w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» zestaw 57 technologii. Przedstawione rozważania pozwoliły określić ilościowe efekty zastosowania hybrydowego modelu, którym były: (i) znaczne ograniczenie liczby rozpatrywanych kryteriów; (ii) indywidualnie dopasowane wagi kryteriów; (iii) uzyskanie przedziałowej oceny oddającej rozbieżność ocen oraz wynikające z nich jakościowe: (i) potencjalne mniejsze zaangażowanie i nakłady pracy ekspertów; (ii) uproszczenie interpretacji; (iii) wyższa transparentność procesu; (iv) lepsze umocowanie wyników z perspektywy decydentów.

⁴⁵⁷ Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl/sjp/weryfikacja;2579736.html> [31.01.2019].

When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts advanced to the stage of science.

William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1883 r.

Podsumowanie

Obszar badawczy związany z ilościową oceną i priorytetyzacją technologii rozwija się intensywnie w odpowiedzi na potrzebę zapewnienia naukowych podstaw, ukierunkowania i wsparcia procesu decyzyjnego w kształtowaniu strategii technologicznej, właściwej alokacji zasobów i doboru działań z zakresu zorientowanego na przyszłość zarządzania technologiami. Implikacją najnowszych podejść do zarządzania technologiami, które zakładają, że sukces polityki innowacyjnej zależy w dużej mierze od zastąpienia biernej obserwacji aktywnym kształtowaniem wizji przyszłości, jest przeprowadzanie wielowymiarowych analiz konsekwencji rozwoju technologii. Przy podejmowaniu kluczowych dla gospodarki decyzji dąży się do opracowania metod, modeli i narzędzi, które będą umożliwiały właściwe wsparcie tego procesu, efektywne zarządzanie technologiami i skuteczne inwestycje w badania i rozwój nowych technologii.

W monografii, na podstawie metodycznej analizy opisywanych w literaturze zagadnień i metod, określono obecny stan wiedzy z zakresu oceny i priorytetyzacji technologii w ujęciu zorientowanego na przyszłość makrozarządzania technologią. Przeprowadzone studia wskazały na istotną lukę w zakresie wielokryterialnej oceny technologii w warunkach niepewności, w sytuacji braku możliwości jednoznacznego określenia parametrów i potencjału technologii. Autorka, po przeanalizowaniu metod stosowanych obecnie w ocenie technologii oraz potencjału innych metod formalnego opisu wiedzy niepełnej i niedokładnej, zaproponowała oryginalny model priorytetyzacji technologii w warunkach niepewności oparty na syntezie koncepcji zbiorów przybliżonych i metody *Data Envelopment Analysis* (DEA). Propozycja została zsyntetyzowana w nowym, koherentnym modelu hybrydowym, zapewniającym holistyczne podejście do ilościowej analizy na potrzeby procesu decyzyjnego.

Wyróżniającą cechą metody DEA jest możliwość jednoczesnego oszacowania wpływu wielu poniesionych nakładów na wiele wyników bez konieczności wyznaczania zależności funkcyjnej. Ponadto metoda nie wymaga uprzedniego określenia wag, gdyż ich wartości ustalane są oddzielnie dla każdej ocenianej jednostki, tak by wyeksponować jej silne strony. Główną zaletą zbiorów przybliżonych na tle innych metod modelowania niepewności jest możliwość uproszczenia oceny przez eliminację zmiennych o małym stopniu diagnostyczności za

pomocą koncepcji reduktu. Ponadto formułowanie przybliżeń zbiorów pozwala rozwiązać problem transformacji miary opisowej i/lub niezgodności ocen.

Zaproponowany proces oceny za pomocą hybrydowego modelu obejmuje trzy następujące po sobie etapy: (i) sformułowanie macierzy ocen technologii – „systemu informacyjnego”, (ii) usunięcie redundancji kryteriów oceny na podstawie zdefiniowanej w teorii zbiorów przybliżonych relacji nierozróżnialności, (iii) opracowanie zmiennych przybliżonych oraz właściwą priorytetyzację za pomocą modelu superefektywności DEA. Rezultatem zastosowania modelu są zakresy wartości ocen każdej technologii: maksymalna – optymistyczna i minimalna – pesymistyczna. Aplikację modelu poprzedza etap inicjalizacji i planowania projektu priorytetyzacji, tj.: określenie celów, źródeł danych, pozyskanie ekspertów, ustalenie zasad współpracy. Z kolei wyniki modelu są bazą do opracowania wniosków i rekomendacji, formułowania strategii rozwoju. Wymienione etapy składają się na autorski proces priorytetyzacji technologii.

Osiągnięty efekt – w postaci hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii – uzyskany został w wyniku realizacji przeprowadzonych prac, obejmujących zadania badawcze:

1. Prace studialne z zakresu doświadczeń z dotychczasowego wykorzystania metod zbiorów przybliżonych i metody DEA do oceny technologii (cel poznawczy).
2. Syntetyczna prezentacja rozwiązań z zakresu zbiorów przybliżonych i metody DEA, objaśniająca podstawowe pojęcia, definicje i modele, przygotowując podstawę do wyprowadzenia struktury hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii (cel poznawczy).
3. Opracowanie nowego, hybrydowego modelu priorytetyzacji technologii (cel metodyczny).
4. Zaprojektowanie procesu oceny technologii z wykorzystaniem zaproponowanego modelu z uwzględnieniem jego potencjału i ograniczeń (cel metodyczny).
5. Wykonanie przykładowej analizy hybrydowym modelem priorytetyzacji technologii i dokonanie jego weryfikacji (cel empiryczny).

Wykonane prace pozwoliły znaleźć odpowiedź na sformułowane pytania badawcze:

1. Jakie metody badawcze znajdują zastosowanie w priorytetyzacji technologii?
 Autorka na podstawie studiów literaturowych zdefiniowała pojęcie priorytetyzacji technologii i w zbiorze popularnych metod oceny technologii zidentyfikowała dwie grupy metod *stricte* priorytetyzujących, którymi są: liczna grupa metod zaliczanych do analiz wielokryterialnych oraz metody kluczowych technologii, konwencjonalnie stosowane jako ocena w dwóch wymiarach. Wymieniła też różne obecne w literaturze podejścia do analizy wiedzy niepewnej możliwe do zastosowania w priorytetyzacji technologii.
2. Jakie atrybuty zbiorów przybliżonych i DEA uprawomocniają celowość ich wykorzystania w priorytetyzacji technologii?

Przeprowadzone studia literaturowe i uporządkowanie wiedzy o teorii zbiorów przybliżonych i metodzie DEA pozwoliły wskazać następujące właściwości rozważanych metod uzasadniające ich wykorzystanie w priorytetyzacji technologii: (i) koncepcję reduktów zbiorów przybliżonych do ograniczenia liczby kryteriów; (ii) przybliżenia zbiorów do modelowania niepewności; (iii) algorytmy optymalizacji liniowej z metody DEA do określenia wag kryteriów; (iv) relację efektywności metody DEA do wyznaczenia syntetycznej oceny.

3. Jakie są dotychczasowe zastosowania zbiorów przybliżonych i metody DEA?

Autorka zidentyfikowała następujące dotychczasowe zastosowania zbiorów przybliżonych: (i) wspomaganie procesu poprzez redukcję i eliminację nieściśłości oraz redundancji, (ii) odkrywanie zależności pomiędzy obiektami, atrybutami i generowanie reguł decyzyjnych oraz (iii) nadawanie wag atrybutom. Natomiast obszary analiz wykorzystujących metodę DEA to przede wszystkim: (i) zrównoważony rozwój, (ii) wybór technologii oraz (iii) prognozowanie technologiczne.

4. Jaki efekt synergiczny wynika z połączenia koncepcji zbiorów przybliżonych i metody DEA?

Syntetycznie przedstawiając zalety hybrydowego modelu, należy podkreślić, że: (i) ogranicza on liczbę rozważanych zmiennych; (ii) eliminuje konieczność arbitralnego wyboru systemu wag w formule syntetycznego wskaźnika oceny technologii; (iii) ujmuje niepewność danych; (iv) uwzględnia zarówno atrakcyjność, jak i koszt rozwoju technologii. Zdaniem autorki zaproponowany model stwarza nową jakość i umożliwia efektywną realizację procesu decyzyjnego.

5. Jakie są ilościowe i jakościowe efekty zastosowania hybrydowego modelu w porównaniu z tradycyjną metodą kluczowych technologii?

Przedstawiony przykład zastosowania hybrydowego modelu do rzeczywistych danych projektu foresightu technologicznego «NT FOR Podlaskie 2020» pozytywnie zweryfikował założone efekty jego wykorzystania. Wstępnie zdefiniowany szeroki zakres oceny poddany został matematycznej ocenie istotności i redukcji. Ograniczenie liczby rozpatrywanych kryteriów oraz dowolności nadawanych wag eliminuje potrzebę eksperckiej analizy i osiągnięcia konsensusu co do szczególnie zasadnych obszarów oceny czy wag poszczególnych kryteriów, które będą równoważyły różne opinie, wartości, potrzeby. Przy tym zarówno redukcja kryteriów, jak i nadawanie obiektywnych wag poszczególnym atrybutom technologii w modelu odbywa się tylko „pod nadzorem” wykonawców projektu, co pozwala ograniczyć koszty priorytetyzacji technologii. W projekcie «NT FOR Podlaskie 2020» nie była rozważana nawet możliwość zróżnicowania ważności kryteriów i zastosowana została prosta średnia arytmetyczna wartości wszystkich wybranych cech. Z kolei uzyskana za pomocą hybrydowego modelu przedziałowa ocena oddaje niezgodność subiektywnych, niekiedy spekulatywnych ocen eksperckich. Zastosowanie hybrydowego modelu priorytetyzacji uzasad-

nia wybór technologii bardziej racjonalnie i obiektywnie, upraszcza interpretację i zapewnia lepsze umocowanie wyników z perspektywy decydentów.

Hybrydowy model jest wartościową opcją w porównaniu z popularnymi, dotychczas stosowanymi w projektach metodami oceny technologii. Dzięki integracji metody DEA i metod zbiorów przybliżonych możliwa jest bardziej obiektywna, a tym samym bardziej wiarygodna ocena technologii. Hybrydowy model stanowi przydatne narzędzie oceny technologii, ułatwia podejmowanie decyzji i ich społeczne legitymizowanie, szczególnie w sytuacji, gdy bazuje się na subiektywnych, intuicyjnych preferencjach i oszacowaniach.

Opracowany model wypełnia lukę w obszarze priorytetyzacji technologii zarówno pod względem metod selekcji kryteriów oceny, jak i uwzględniania niepewności wartości kryteriów oceny. Jest on nową propozycją oceny technologii realizującą konieczność wieloaspektowej, obiektywnej oceny z jednoczesnym modelowaniem niejednoznaczności jednostkowych ocen. Ponadto umożliwia poszerzenie oceny i bardziej miarodajne spojrzenie na osiągnięte w rankingach miejsca. Dodatkowo, wkomponowany w zaproponowany algorytm oceny technologii, zapewnia wysoką przejrzystość procedur oceny.

Opracowany model stanowi element szerszej metodyki oceny i priorytetyzacji technologii zorientowanej na perspektywne makrozarządzanie technologią. Autorka zakłada kontynuację badań zarówno w zakresie rozwoju metodyki, jak również jej adaptacji dla poziomu mezozarządzania w szeroko rozumianym obszarze życia społeczno-gospodarczego. Rozwój metodyki związany jest z dodatkowymi możliwościami analitycznymi DEA, które pozwalają określić najważniejsze dla ocenianej technologii atrybuty mające wpływ na osiągnięte wyniki oraz dokonywanie symulacji wpływu zmian wartości atrybutów. Ponadto możliwe jest określenie grup technologii konkurencyjnych. Jednocześnie autorka zakłada dostosowanie modelu do poziomu mezozarządzania poprzez uwzględnienie lokalnych/regionalnych warunków i formułowanych potrzeb przy realizacji zadań opracowania i kształtowania wizji strategii rozwoju technologicznego w nowatorskich opracowaniach zmiennych przybliżonych.

Hybrydowy model i proponowany algorytm oceny, nawet bez uzupełnienia i rozbudowy, można traktować jako ogólny referencyjny sposób postępowania w złożonych problemach wielowymiarowej porównawczej priorytetyzacji licznego zbioru technologii, dającego się scharakteryzować za pomocą zunifikowanego, określonego *a priori* zbioru kryteriów oceny. Model nie ma ograniczeń co do specyfiki konkretnych grup technologii, które można poddać ocenie. Szczególnie zasadne, przynoszące największe wymierne korzyści, jest zastosowanie modelu do dużych zbiorów danych, w odniesieniu do których niemożliwa bądź zbyt kosztowna jest analiza za pomocą tradycyjnych metod. Weryfikacja modelu na danych projektu «NT FOR Podlaskie 2020», którego beneficjentem była Politechnika Białostocka, warunkowana była jedynie dostępnością danych. Ogólne scenariusze

projektów badawczych zakładających wykorzystanie hybrydowego modelu do wspierania procesów decyzyjnych będą zgodne z opracowanym w rozdziale 3.2 algorytmem procesu priorytetyzacji technologii. Punktem wyjścia będzie sformułowana na podstawie określonego celu badania macierz oceny technologii, zaś efektem końcowym staną się rankingi technologii bazujące na otrzymanych zakresach ocen, stanowiące podstawę do opracowania rekomendacji.

Należy podkreślić, że opracowany model może znaleźć szerokie zastosowanie w trakcie wdrażania w Polsce rozwiązań z zakresu Przemysłu 4.0. Celem Przemysłu 4.0 jest zwiększenie wydajności operacyjnej i produktywności, a także osiągnięcie wyższego stopnia automatyzacji⁴⁵⁸. Główne cechy tego nowego rodzaju produkcji to: cyfryzacja, robotyzacja, optymalizacja i adaptacja oraz automatyczna wymiana danych i komunikacja⁴⁵⁹. Przemysł 4.0 łączy się nie tylko z technologiami internetowymi i implementacją zaawansowanych algorytmów komputerowych, ale może być też traktowany jako przemysłowy proces dodawania wartości i zarządzania wiedzą⁴⁶⁰. Ponadto paradygmaty Przemysłu 4.0 są krokiem naprzód ku bardziej zrównoważonemu tworzeniu wartości przemysłowej stosującej ekonomiczny przydział zasobów⁴⁶¹. Efektywna reorientacja krajowych przedsiębiorstw na rozwiązania wykorzystujące systemy cyberfizyczne i cyfryzację danych przemysłowych w chmurach oraz w publicznych i prywatnych składnicach danych będzie wymagała rozwoju i adaptacji zaawansowanych technologii. Zaproponowany model może ułatwić priorytetyzację tych technologii w warunkach niepewności, a w rezultacie zwiększyć efektywność wykorzystania prywatnych i publicznych środków na prace badawczo-rozwojowe w zakresie produkcji przyszłości. W ocenie autorki ten obszar zastosowań modelu nie wymaga wprowadzania zmian w jego procedurach obliczeniowych, a jego parametryzacja sprowadzałaby się do ustalenia zbioru ocenianych technologii oraz ich cech. Model – dzięki swojej elastyczności – umożliwi również uwzględnienie specyfiki ocenianych technologii bądź preferencji decydentów poprzez dostosowanie lub ograniczenie stosowania algorytmicznego systemu wyznaczania wag poszczególnych atrybutów.

⁴⁵⁸ Y. Lu (2016), *Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues*, "Journal of Industrial Information Integration" 6: 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.

⁴⁵⁹ V. Roblek, M. Meško, A. Krapež (2016), *A complex view of Industry 4.0*, SAGE Open 6(2), <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>.

⁴⁶⁰ Y. Lu, *Industry 4.0...*, op. cit.

⁴⁶¹ T. Stock, G. Seliger (2016), *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0*, "Procedia CIRP" 40: 536–541, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>.

Streszczenie

W monografii zaprezentowano hybrydowy model priorytetyzacji technologii będący oryginalną propozycją rozwiązania złożonego zagadnienia zorientowanej na przyszłość porównawczej oceny technologii przeprowadzanej w sytuacji braku możliwości jednoznacznego określenia parametrów i potencjału technologii oraz wynikającej z tego niepewności. W modelu zaproponowano synergiczne połączenie metod zbiorów przybliżonych (*Rough Set*) i analizy obwiedni danych (*Data Envelopment Analysis* – DEA).

Prezentację struktury modelu poprzedza przegląd i synteza stanu wiedzy w zakresie metod dotychczas stosowanych w ocenie technologii. Zidentyfikowany brak badań i wiedzy dotyczących wykorzystania modeli hybrydowych w procesie priorytetyzacji technologii – a w szczególności łączących teorię zbiorów przybliżonych oraz metody badań operacyjnych w celu zwiększenia obiektywizmu oceny oraz ograniczenia arbitralności decyzyjnej przy ujmowaniu subiektywnych opinii – był motywem opracowania i zbadania możliwości hybrydowego modelu. W monografii przedstawiono także fundamentalia teorii zbiorów przybliżonych i metody DEA tworzące teoretyczną podbudowę ich syntezy w hybrydowym modelu.

W hybrydowym modelu zastosowano: (i) koncepcję reduktów z teorii zbiorów przybliżonych do ograniczenia liczby kryteriów; (ii) przybliżenia zbiorów do modelowania niepewności; (iii) algorytmy optymalizacji liniowej z metody DEA do obiektywnego określenia wag kryteriów; (iv) relację efektywności metody DEA do wyznaczenia syntetycznej oceny. Zaproponowany proces oceny za pomocą hybrydowego modelu obejmuje trzy podstawowe etapy: (i) sformułowanie macierzy ocen technologii; (ii) usunięcie redundancji kryteriów oceny na podstawie zdefiniowanej w teorii zbiorów przybliżonych relacji nierozróżnialności i koncepcji reduktów; (iii) opracowanie zmiennych przybliżonych ujmujących stopień niepewności oraz właściwą priorytetyzację za pomocą modelu superefektywności DEA. Rezultatem zastosowania modelu są zakresy wartości ocen każdej technologii: maksymalna – optymistyczna i minimalna – pesymistyczna. Algorytmy modelu zostały przedstawione za pomocą uniwersalnego języka równań matematycznych oraz schematów UML.

Zastosowanie opracowanego hybrydowego modelu do rzeczywistych danych projektu foresightu technologicznego «NT FOR Podlaskie 2020» pozytywnie zwerifikowało założone efekty jego wykorzystania. Uzyskane wyniki pozwalają na bardziej obiektywne i racjonalne uzasadnienie wyboru technologii, uproszczenie interpretacji i lepsze uwierzytelnienie wyników z perspektywy decydentów.

Prezentowany model może być traktowany jako referencyjny w złożonych problemach wielokryterialnej porównawczej oceny licznego zbioru technologii, które można scharakteryzować, korzystając ze zunifikowanego, określonego

a priori zbioru atrybutów, które opisują własności technologii lub wynikają z jej otoczenia bez ograniczeń co do specyfiki technologii. Zaproponowany model może ułatwić priorytetyzację technologii w warunkach niepewności, a w rezultacie zwiększyć efektywność wykorzystania prywatnych i publicznych środków na prace badawczo-rozwojowe związane z wdrażaniem w Polsce rozwiązań w zakresie produkcji przyszłości zgodnie z koncepcją Przemysłu 4.0.

Summary

The monograph presents a hybrid model of technology prioritisation, which is an original proposal to solve the complex issue of a comparative future-oriented technology assessment carried out in the situation of vague determination of parameters, technology potential and the resulting uncertainty. The model proposes a synergistic combination of Rough Sets and Data Envelopment Analysis (DEA).

The presentation of the model structure is preceded by a review and synthesis of state of the art in the field of methods that have been used in technology assessment. The identified lack of research and knowledge regarding the use of hybrid models in the process of technology prioritisation – and, in particular, integrating Rough Sets theory and operational research methods to increase the objectivity of evaluation and reduce decision-making arbitrariness while analysing subjective opinions, was the motivation to develop and explore the capabilities of the hybrid model. The monograph also presents the foundations of the Rough Set Theory and DEA methods that form the theoretical framework for their synthesis in the hybrid model.

The hybrid model uses: (i) the concept of reducts from the Rough Set Theory to limit the number of criteria; (ii) lower and upper approximation of the sets to model uncertainty; (iii) linear optimisation algorithms from the DEA method for objective determination of criteria weights; (iv) the relation of the DEA method efficiency to formulate the assessment score. The proposed assessment process by the hybrid model includes three basic stages: (i) the formulation of the technology assessments data set; (ii) the removal of the redundancy of the assessment criteria on the basis of the indiscernibility relations and the concept of reducts defined in the Rough Set Theory; (iii) the development of the rough variables that capture the vagueness or uncertainty and the prioritization using the SE-DEA model. The use of the hybrid model implies the consideration of two variants of the assessment: optimistic and pessimistic, formulated based on a lower and upper approximation of the rough variables. The model's algorithms have been presented using the universal language of mathematical equations and UML schemes.

An empirical application of the hybrid model to the real data of the technological foresight project «NT FOR Podlaskie 2020» Regional Strategy of Nanotechnology Development positively verified the assumed effects of its use. The advantage of the hybrid prioritisation model is that it justifies the choice of technology more rationally and objectively, simplifies interpretation and better validates the results from the perspective of decision makers. The hybrid model can be treated as a reference one in complex problems of multi-criteria comparative assessment of a large set of technologies that can be characterised using a unified, earlier defined set of attributes that describe the technology or their interrelations as well as the interactions without limitation to the specifics of the technology.

The proposed model may facilitate the prioritisation of technologies in conditions of uncertainty and increase the efficiency of using private and public funds for research and development related to the implementation of future production solutions in Poland following the Industry 4.0 concept.

Bibliografia

- Abbas Z., Burney A. (2016), *A Survey of Software Packages Used for Rough Set Analysis*, "Journal of Computer and Communications" 4(09): 10–18, <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.49002>
- Adler N., Golany B. (2001), *Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe*, "European Journal of Operational Research" 132(2): 260–273, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00150-8)
- Adler N., Golany B. (2002), *Including Principal Component Weights to improve discrimination in Data Envelopment Analysis*, "Journal of the Operational Research Society" 53(9): 985–991, <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601400>
- Alinezhad A., Makui A., Kiani Mavi R., Zohrehbandian M. (2011), *An MCDM-DEA approach for technology selection*, "Journal of Industrial Engineering International" 7(12): 32–38
- Amin G.R., Emrouznejad A. (2013), *A new DEA model for technology selection in the presence of ordinal data*, "International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 65: 1567–1572, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4280-3>
- Andersen P., Petersen N.C. (1993), *A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis*, "Management Science" 39(10): 1261–1264, <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- Anderson T.R., Daim T.U., Kim J. (2008), *Technology forecasting for wireless communication*, "Technovation" 28(9): 602–614, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.12.005>
- Anderson T.R., Hollingsworth K., Inman L. (2001), *Assessing the rate of change in the enterprise database system market over time using DEA*, "Management of Engineering and Technology", PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol. 1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199), <https://doi.org/10.1109/PICMET.2001.951928>
- Arcade J., Godet M., Meunier F., Roubelat F. (1999), *Structural analysis with the MIC-MAC method & Actor's strategy with MACTOR method*, Futures Research Methodology, American Council for the United Nations University: The Millennium Project

Atanassov K.T. (1983), *Intuitionistic fuzzy sets*, w: Proceedings of the VII ITKR's Session, Sofia, Bulgaria, 7–9 June 1983 (reprinted in "International Journal Bioautomation" 2016), 20: 1–6, http://www.biomed.bas.bg/bioautomation/2016/vol_20.s1/files/20.s1_02.pdf [24.07.2018]

Atanassov K.T. (2017), *Type-1 Fuzzy Sets and Intuitionistic*, "Fuzzy Sets, Algorithms" 10(3), 106: 1–12, <https://doi.org/10.3390/a10030106>

Azar A.T., Kumar S.S., Inbarani H.H., Hassanien A.E. (2016), *Pessimistic multi-granulation rough set-based classification for heart valve disease diagnosis*, "International Journal of Modelling Identification and Control" 26(1): 42–51, <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2016.077744>

Azzone G., Manzini R. (2008), *Quick and dirty technology assessment: The case of an Italian Research Centre*, "Technological Forecasting and Social Change" 75(8): 1324–1338, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2007.10.004>

Bai C., Sarkis J. (2017), *Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: Modeling the decision process*, "International Journal of Production Economics" 188: 86–104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.013>

Banke J. (2010), *Technology Readiness Levels Demystified*, NASA, https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html [12.1.2019]

Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. (1984), *Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis*, "Management Science" 30(9): 1078–1092, <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>

Banker R.D., Gilford J.L. (1988), *A relative efficiency model for the evaluation of public health nurse productivity*, Pittsburgh: Mimeo, Carnegie Mellon University

Banker R.D., Janakiraman S., Natarajan R. (2004), *Analysis of trends in technical and allocative efficiency: An application to Texas public school districts*, "European Journal of Operational Research" 154(2): 477–491, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00183-8)

Bazan J.G. (1998), *Metody wnioskowań aproksymacyjnych dla syntezy algorytmów decyzyjnych*, praca doktorska, Uniwersytet Warszawski, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki Instytut Matematyki, http://fenix.univ.rzeszow.pl/bazan/bazan_dr.pdf [21.10.2018]

Belton V., Stewart T.J. (2002), *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*, Boston: Kluwer Academic Publications, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>

- Belton V., Vickers S.P. (1993), *Demystifying DEA – a Visual Interactive Approach based on Multiple Criteria Analysis*, "Journal of the Operational Research Society" 44(9): 883–896, <https://doi.org/10.1057/jors.1993.157>
- Benedykt E. (2013), *Foresight. Sztuka i techniki zarządzania przyszłością*, Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową, Gdańsk, http://www.ibngr.pl/content/download/1474/16065/file/Foresight-Sztuka_i_tehniki_zarzadzania_przyszloscia.pdf [13.10.2018]
- Bińczyk E. (2015), *Monitorowanie technologii a nieusuwalne granice sterowalności (na przykładzie krytyki projektu inżynierii klimatu)*, w: M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43): 113–136
- Bochenek M. (2012), *Ryzyko i niepewność w naukach ekonomicznych – rozważania semantyczne*, „Ekonomia” 4(21): 46–63, http://www.dbc.wroc.pl/Content/22688/Bochenek_Ryzyko_i_niepewnosc_w_naukach.pdf [17.07.2018]
- Brans J.P. (1982), *L'ingénierie de la décision: élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*, Presses de l'Université Laval.
- Braun E. (2005), *Technology in Context. Technology assessment for managers*, Routledge.
- Bronk A. (2006), *Metoda naukowa*, „Nauka” 1, 47–64, http://www.pan.poznan.pl/nauki/N_106_03_Bronk.pdf [27.01.2019]
- Brooks R.J., Tobias A.M. (1996), *Choosing the best model: Level of detail, complexity, and model performance*, "Mathematical and Computer Modelling" 24(4): 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.011>
- Cagnin C., Havas A., Saritas O. (2013), *Future-oriented technology analysis: Its potential to address disruptive transformations*, "Technological Forecasting & Social Change" 80(3): 379–385, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.001>
- Cetron M.J., Connor L.W. (1972), *A Method for Planning and Assessing Technology against Relevant National Goals in Developing Countries*, w: M.J. Cetron, B. Bartocha (red.), *The Methodology of Technology Assessment*, Gordon and Breach, New York
- Chan F.T.S., Chan H.K., Chan M.H., Humphreys P.K. (2006), *An integrated fuzzy approach for the selection of manufacturing technologies*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 27: 747–758, <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2246-9>

Chan F.T.S., Chan M.H., Tang N.K.H. (2000), *Evaluation methodologies for technology selection*, "Journal of Materials Processing Technology" 107: 330–337, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00679-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00679-8)

Charnes A., Cooper W.W., Golany B., Seiford L., Stutz J. (1985), *Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions*, "Journal of Econometrics" 30(1–2): 91–107, [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(85\)90133-2](https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90133-2)

Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. (1978), *Measuring the efficiency of decision-making units*, "European Journal of Operational Research" 2(6): 429–444, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

Charnes A., Haag S., Jaska P., Semple J.H. (1992), *Sensitivity of Efficiency Classifications in the Additive Model of Data Envelopment Analysis*, "International Journal of Systems Science" 23(5): 789–798

Chaudhuri S.B., Rahman M. (2018), *Design of a Medical Expert System (MES) Based on Rough Set Theory for Detection of Cardiovascular Diseases*, w: K. Saeed, N. Chaki, B. Pati, S. Bakshi, D. Mohapatra (red.), *Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering*, "Advances in Intelligent Systems and Computing" 563: 325–332, https://doi.org/10.1007/978-981-10-6872-0_30

Chen C.-J., Chung M.-C., Wei C.-H. (2006), *Government policy of technology selection for advanced traveler information systems*, "R&D Management" 36(4): 439–450, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2006.00445.x>

Chen Y. (2004), *Ranking efficient units in DEA*, "Omega" 32(3): 213–219, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2003.11.001>

Chen Y. (2006), *Multiple Criteria Decision Analysis: Classification Problems and Solutions*, PhD thesis in Systems Design Engineering, University of Waterloo, <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/OWTU/TC-OWTU-948.pdf> [11.10.2018]

Chen Y.S. (2016), *A comprehensive identification-evidence based alternative for HIV/AIDS treatment with HAART in the healthcare industries*, "Computer Methods and Programs in Biomedicine" 131: 111–126, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.04.001>

Chen Y.S. (2016), *An empirical study of a hybrid imbalanced-class DT-RST classification procedure to elucidate therapeutic effects in uremia patients*, "Medical & Biological Engineering & Computing" 54(6): 983–1001, <https://doi.org/10.1007/s11517-016-1482-0>

- Cheruku R., Edla D.R., Kuppili V., Dharavath R. (2018), *RST-BatMiner: A fuzzy rule miner integrating rough set feature selection and Bat optimization for detection of diabetes disease*, "Applied Soft Computing" 67: 76–780, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.032>
- Chesbrough H. (2003), *Open Initiative: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology* Boston, MA: Harvard Business School Press
- Chodakowska E. (2012), *Ocena efektywności działania szkół gimnazjalnych metodą Data Envelopment Analysis na przykładzie powiatu grodzkiego Białystok*, praca doktorska, Uniwersytet Warszawski, Wydział Zarządzania
- Chodakowska E. (2014), *Construction of the Environmental Performance Index Using DEA*, "Quantitative Methods in Economics" 15(2): 296–306, http://qme.sggw.pl/pdf/MIBE_T15_z2_28.pdf
- Chodakowska E. (2015), *The Future of Evaluation of Lower Secondary Schools' Management*, "Business, Management and Education" 13(1): 112–125, <https://doi.org/10.3846/bme.2015.256>
- Chodakowska E. (2018), *Koncepcja analizy wyłaniających się technologii za pomocą metody DEA i zbiorów przybliżonych*, w: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t. 2, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 125–136, http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2018/T2/2018_t2_125.pdf [16.07.2018]
- Chodakowska E. (2018), *Rough and fuzzy DEA in the process of prospective technology analysis*, w: A. Emrouznejad, E. Thanassoulis (red.), *Data Envelopment Analysis and Performance Measurement: Recent Developments: Proceedings of the DEA40: International Conference of Data Envelopment Analysis*, Aston Business School, UK: 133–142
- Chodakowska E., Nazarko J. (2017), *Environmental DEA method for assessing productivity of European countries*, "Technological and Economic Development of Economy" 23(4): 589–607, <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2016.1272069>
- Chodakowska E., Nazarko J. (2019), *Rough Sets and DEA – a hybrid model for technology assessment* (w druku)
- Chodakowska E., Wardzińska K. (2013), *The Attempt to Create an Internal Credit Risk Rating of Production Companies with the Use of Operational Research Method*, "Quantitative Methods In Economics" 14(1): 74–83, http://qme.sggw.pl/wp-content/uploads/MIBE_T14_z1.pdf [12.07.2018]

Choi M., Choi H.-L., Yang H. (2014), *Procedural characteristics of the 4th Korean technology foresight*, "Foresight" 16(3): 198–209, <https://doi.org/10.1108/FS-11-2012-0087>

Churchman C.W., Ackoff R.L. (1954), *An approximate measure of value*, "Journal of Operations Research Society of America" 2(2): 172–187, <https://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>

Chuu S.-J. (2009), *Selecting the advanced manufacturing technology using fuzzy multiple attributes group decision making with multiple fuzzy information*, "Computers & Industrial Engineering" 57(3): 1033–1042, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.011>

Ciflikli C., Kahya-Ozyirmidokuz E. (2012), *Enhancing product quality of a process*, "Industrial Management & Data Systems" 112(8): 1181–1200, <https://doi.org/10.1108/02635571211264618>

Coates J.F. (1976), *Technology assessment – A tool kit*, "Chemtech": 372–383, za A.L. Ported (1995), "Technology Assessment, Impact Assessment" 13(2): 135–151, <https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726087>

Cook W.D., Chai D., Doyle J., Green R. (1998), *Hierarchies and Groups in DEA*, "Journal of Productivity Analysis" 10(2): 177–198, <https://doi.org/10.1023/A:1018625424184>

Cooper W.W., Park K.S., Pastor J.T. (1999), *RAM: a range adjusted measure of inefficiency for use with additive models, and relations to other models and measures in DEA*, "The Journal of Productivity Analysis" 11(1): 5–42, <https://doi.org/10.1023/A:100770130>

Cooper W.W., Park K.S., Yu G. (1999), *IDEA and AR-IDEA: Models for dealing with imprecise data in DEA*, "Management Science" 45(4): 597–607, <https://doi.org/10.1287/mnsc.45.4.597>

Cooper W.W., Seiford L.M., J. Zhu (red.) (2011), *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Second Edition, Springer Science & Business Media

Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. (2007), *Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Second Edition, Springer

Cornelis C., De Cock M., Radzikowska A.M. (2008), *Fuzzy rough sets: from theory into practice*, w: W. Pedrycz, A. Skowron, V. Kreinovich (red.), *Handbook of Granular Computing*, Wiley, s. 533–552

- Coster De R., Butler C. (2005), *Assessment of proposals for new technology ventures in the UK: characteristics of university spin-off companies*, "Technovation" 25: 535–543, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2003.10.002>
- Cuhls K., Kuwahara T. (1994), *Outlook for Japanese and German future technology - comparing technology forecast surveys*, Heidelberg: Physica-Verlag ("Technology, Innovation and Policy")
- Cullinane K.P.B., Wang T.-F. (2006), *The efficiency of European container ports: A cross-sectional data envelopment analysis*, "International Journal of Logistics: Research & Applications" 9(1): 19–31, <https://doi.org/10.1080/13675560500322417>
- Czakov W. (red.) (2015), *Podstawy metodologii badań w naukach o zarządzaniu*, Wolters Kluwer business, Warszawa
- Daim T., Gerdtsri N., Basoglu N. (2011), *Technology Assessment: Forecasting Future Adoption of Emerging Technologies*, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG. Berlin
- Decker M., Ladikas M. (red.) (2004), *Bridges between Science, Society and Policy. Technology Assessment – Methods and Impacts*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06171-8>
- Deng Ju-Long (1982), *Control Problems of Grey Systems*, "Systems and Control Letters" 1(5): 288–294, [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X)
- Dimitras A.I., Słowiński R., Susmaga R., Zopounidis C. (1999), *Business failure prediction using rough sets*, "European Journal of Operational Research" 114(2): 263–280, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00255-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00255-0)
- Doyle J., Green R. (1993), *Data Envelopment Analysis and Multiple Criteria Decision Making*, "Omega" 21(6): 713–715, [https://doi.org/10.1016/0305-0483-\(93\)90013-B](https://doi.org/10.1016/0305-0483-(93)90013-B)
- Doyle J., Green R. (1994), *Efficiency and Cross-efficiency in DEA: Derivations, Meanings and Uses*, "Journal of the Operational Research Society" 45(5): 567–578, <https://doi.org/10.1057/jors.1994.84>
- Dubey Y.K., Mushrif M.M., Mitra K. (2016), *Segmentation of brain MR images using rough set based, intuitionistic fuzzy clustering*, "Biocybernetics and Biomedical Engineering" 36(2): 413–426, <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2016.01.001>
- Dubois D., Prade H. (1980), *Fuzzy Sets and Systems, Theory and Applications*, "Mathematics in Science and Engineering" 144, Academic Press

Dubois D., Prade H. (2015), *The First Steps in Fuzzy Set Theory in France Forty Years Ago*, LFA: 24ème Conférence Francophone sur la Logique Floue et ses Applications: 29–41, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01316812/document> [2.11.2018]

Dubois D., Prade H. (1987), *Twofold fuzzy sets and rough sets–Some issues in knowledge representation*, “Fuzzy Sets and Systems” 23(1): 3–18, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90096-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90096-0)

Dubois D., Prade H. (1990), *Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets*, “International Journal of General Systems” 17 (2–3): 191–209, <https://doi.org/10.1080/03081079008935107>

Dubois D., Prade H. (1993), *Toll Sets and Toll Logic*, w: R. Lowen, M. Roubens (red.), *Fuzzy Logic*, “Theory and Decision Library” (Series D: System Theory, Knowledge Engineering and Problem Solving) 12, Springer, Dordrecht: 169–177, https://doi.org/10.1007/978-94-011-2014-2_17

Durand T. (2003), *Twelve lessons from ‘Key Technologies 2005’: the French Technology Foresight Exercise*, “Journal of Forecasting” 22(2–3): 161–177, <https://doi.org/10.1002/for.856>

Edirisinghe N.C.P., Zhang X. (2007), *Generalized DEA model of fundamental analysis and its application to portfolio optimization*, “Journal of Banking & Finance” 31(11): 3311–3335, <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2007.04.008>

Edwards W. (1971), *Social utilities*, The Engineering Economist Summer Symposium, Series 6: 119–129

Edwards W. (1977), *How to use multi-attribute utility measurement for social decision-making*, “IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics” 7(5): 326–340, <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>

Edwards W., Barron F.H. (1994), *SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Measurement*, “Organizational Behavior and Human Decision Process” 60(3): 306–325, <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>

Emrouznejad A., De Witte K. (2010), *COOPER-framework: A unified process for non-parametric projects*, “European Journal of Operational Research” 207(3): 1573–1586, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.025>

Emrouznejad A., Tavana M. (red.) (2014), *Performance Measurement with Fuzzy Data Envelopment Analysis*, “Studies in Fuzziness and Soft Computing” 309, Springer

- Ende van den J., Mulder K., Knot M., Moors E., Vergragt P. (1998), *Traditional and Modern Technology Assessment: Toward a Toolkit*, "Technological Forecasting and Social Change" 58(1-2): 5-21, [https://doi.org/10.1016/S0040-1625-\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1625-(97)00052-8)
- Fan J.-L., Zhang X., Zhang J., Peng S. (2015), *Efficiency evaluation of CO2 utilization technologies in China: A super-efficiency DEA analysis based on expert survey*, "Journal of CO2 Utilization" 11: 54-62, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.01.004>
- Farrell M.J. (1957), *The Measurement of Productive Efficiency*, "Journal of the Royal Statistical Society". Series A (General)" 120(3): 253-290, <https://doi.org/10.2307/2343100>
- Fayyad U.M., Irani K.B. (1992), *On the Handling of Continuous-Valued Attributes in Decision Tree Generation*, "Machine Learning" 8(1): 87-102, <https://doi.org/10.1007/BF00994007>
- Fayyad U.M., Irani K.B. (1993), *Multi-interval discretization of continuous-valued attributes for classification learning*, Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93), <https://www.ijcai.org/Proceedings/93-2/Papers/022.pdf> [10.08.2018]
- Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (red.) (2005), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, <https://doi.org/10.1007/b100605>
- Fodor J., Roubens M. (1994), *Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support*, Kluwer, Dordrecht
- Förster B. (2015), *Technology foresight for sustainable production in the German automotive supplier industry*, "Technological Forecasting and Social Change" 92: 237-248, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.09.010>
- Frigg R., Hartmann S. (2018), *Models in Science*, w: E.N. Zalta (red.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2018 Edition), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/> [27.01.2019]
- Galanopoulos K., Aggelopoulos S., Kamenidou I., Mattas K. (2006), *Assessing the effects of managerial and production practices on the efficiency of commercial pig farming*, "Agricultural Systems" 88(25-3): 125-141, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.03.002>

- Gao K. (2008), *Predicting Grid Performance Based on Novel Reduct Algorithm*, w: I. Lovrek, R.J. Howlett, L.C. Jain (red.), *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, KES 2008. "Lecture Notes in Computer Science" 5178, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 289-296, https://doi.org/10.1007/978-3-540-85565-1_36
- Gao Y., Zhang X., Wu L., Yin S., Lu J. (2017), *Resource basis, ecosystem and growth of grain family farm in China: Based on rough set theory and hierarchical linear model*, "Agricultural Systems" 154: 157-167, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.013>
- Garcia-Sánchez I.M. (2007), *Efficiency and effectiveness of Spanish football teams: a three-stage-DEA approach*, "Central European Journal of Operations Research" 15(1): 21-45, <https://doi.org/10.1007/s10100-006-0017-4>
- Garfield E. (1988), *Theory of Technology's Role in Economic Growth Brings MIT's Robert M. Solow the 1987 Nobel Prize in Economic Sciences*, "Essays of an Information Scientist 11, Science Literacy, Policy, Evaluation, and Other Essays".
- Garza-Morales R., Lopez-Irarragori F., Sanchez R. (2016), *On the application of rough sets to skeletal maturation classification*, "Artificial Intelligence Review" 45(4): 489-508, <https://doi.org/10.1007/s10462-015-9450-x>
- Gau W.L., Buehrer D.J. (1993), *Vague sets*, "EEE Transactions Systems, Man, Cybernetics" 23(2): 610-614, <https://doi.org/10.1109/21.229476>
- Gavigan J.P., Scapolo F., Keenan M., Miles I., Farhi F., Lecoq D., Capriati M., Bartolomeo T.D. (red.) (2001), *A Practical Guide to Regional Foresight*, FOREN, "Foresight for Regional Development Network, European Communities", <http://foresight.jrc.ec.europa.eu/documents/eur20128en.pdf> [12.07.2018]
- Gentilhomme Y. (1968), *Les sous-ensembles flous en linguistique*, "Cahiers de Linguistique Théorique et Appliquée" 5: 47-63.
- Goguen J.A. (1967), *L-fuzzy sets*, "Journal of Mathematical Analysis and Applications" 18(1): 145-174
- Goos P., Meintrup D. (2015), *Statistics with JMP: Graphs, Descriptive Statistics and Probability*, John Wiley & Sons
- Górny Z., Kluska-Nawarecka S., Wilk-Kołodziejczyk D., Regulski K. (2015), *Methodology for the Construction of a Rule-Based Knowledge Base Enabling the Selection of Appropriate Bronze Heat Treatment Parameters Using Rough Sets*, "Archives of Metallurgy and Materials" 60(1): 309-312, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0050>

- Greco S., Matarazzo B., Słowiński R. (1999), *Rough approximation of a preference relation by dominance relations*, "European Journal of Operational Research" 117(1): 63–83, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00127-1)
- Greco S., Matarazzo B., Słowiński R. (2000), *Extension of the rough set approach to multicriteria decision support*, "Information Systems and Operational Research (INFOR)" 38(3): 161–196, <https://doi.org/10.1080/03155986.2000.11732407>
- Greco S., Matarazzo B., Słowiński R. (2001), *Rough sets theory for multicriteria decision analysis*, "European Journal of Operational Research" 129(1): 1–47, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00167-3)
- Griliches Z. (1987), *Productivity: Measurement Problems*, w: J. Eatwell, M. Milgate, P. Newman (red.), *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, vol. 3, Palgrave Macmillan
- Gudanowska A.E. (2014), *Atrakcyjność i wykonalność nanotechnologii priorytetowych dla rozwoju województwa podlaskiego w świetle wyników badania foresightowego*, „Mechanik” 87(3), s. 222–227, http://www.nazarko.pl/public/data/resource/upload/00003/2531/file/atrakcyjnosc_i_wykonalnosc_nanotechnologii_priorytetowych_dla_rozwoju_województwa_podlaskiego_w_swietle_wynikow_badian foresightowego.pdf [12.01.2019]
- Gudanowska A.E. (2014), *Mapowanie technologii jako jedna z metod analizy technologii w świetle wybranych zagranicznych doświadczeń*, „Economics and Management” 1: 265–281, <http://dx.doi.org/10.12846/j.em.2014.01.16>
- Gudanowska A.E. (2015), *Istota współczesnych technologii w kontekście procesów zarządzania technologią i foresightu technologicznego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie” 83: 195–205
- Gudanowska A.E., Kononiuk A. (red.) (2013), *Kierunki rozwoju nanotechnologii w województwie podlaskim. Mapowanie. Marszruty. Trendy*, „Rozprawy Naukowe” nr 245, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok
- Guitoni A., Martel J.M. (1998), *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*, "European Journal of Operational Research" 109(2): 501–521, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3)
- Gummesson E. (2017), *Case Theory in Business and Management: Reinventing Case Study Research*, SAGE Publications Ltd.
- Guo P., Tanaka H. (2001), *Fuzzy DEA: A perceptual evaluation method*, "Fuzzy Sets and Systems" 119(1):149–160, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114-\(99\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114-(99)00106-2)

Guzik B. (2009), *Podstawowe modele DEA w badaniu efektywności gospodarczej i społecznej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu

Guzik B. (2009), *Podstawowe możliwości analityczne modelu CCR-DEA*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 19(1): 55–75

Gwiazdowicz M., Stankiewicz P. (red.) (2015), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43)

Hajdas M., Szabela-Pasierbińska E. (2016), *Metody przewidywania trendów w makroooczeniu*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 459: 232–244, <https://doi.org/110.15611/pn.2016.459.22>

Halicka K. (2016), *Prospektywna analiza technologii – metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok

Halicka K. (2017), *Main Concepts of Technology Analysis in the Light of the Literature on the Subject*, 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, “Procedia Engineering” 182: 291–298, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.196>

Hassanien A.E., Abraham A., Peters J.F., Schaefer G., Henry C. (2009), *Rough Sets and Near Sets in Medical Imaging: A Review*, “IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine” 13 (6): 955–968, <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2017017>

He Y., Pang Y., Zhang Q., Jiao Z., Chen Q. (2018), *Comprehensive evaluation of regional clean energy development levels based on principal component analysis and rough set theory*, “Renewable Energy” 122: 643–653, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.028>

Hemert van P., Nijkamp P. (2010), *Knowledge investments, business R&D and innovativeness of countries: A qualitative meta-analytic comparison*, “Technological Forecasting and Social Change” 77(3): 369–384, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.08.007>

Hirota K. (1981), *Concepts of probabilistic sets*, “Fuzzy Sets and Systems” 5(1): 31–46, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90032-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90032-4)

Hollingsworth B., P.J. Dawson, N. Maniadakis (1999), *Efficiency measurement of health care: a review of non-parametric methods and applications*, “Health Care Management Science” 2(3): 161–172, <https://doi.org/10.1023/A:1019087828488>

- Hryniewicz O. (2010), *Funkcja przynależności zbioru rozmytego – metody konstrukcji i interpretacji*, Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, Seria: „Studia i Materiały” 31, s. 8–17
- Hsu Y.-G., Tzeng G.-H., Shyu J.Z., 2003. *Fuzzy multiple criteria selection of government-sponsored frontier technology R&D projects*, “R&D Management” 33(5): 539–551, <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00315>
- Huang Q., Wang J., Su H., Yang L., Ding Z., Zhang G. (2016), *A fault feature reduction method based on rough set attribute reduction and principal component Analysis*, “Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC)”: 6629–6633, <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554399>
- Hwang C.-L., Yoon K. (1981), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*, Springer-Verlag, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Inbarani H.H., Azar A.T., Jothi G. (2014), *Supervised hybrid feature selection based on PSO and rough sets for medical diagnosis*, “Computer Methods and Programs in Biomedicine” 113(1): 175–185, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.10.007>
- Inman O.L. (2004), *Technology forecasting using data envelopment analysis*, PhD dissertation. Department of Engineering and Technology Management. Portland State University, <https://core.ac.uk/download/pdf/37776964.pdf> [3.11.2018]
- Inman O.L., Anderson T.R., Harmon R.R. (2006), *Predicting U.S. jet fighter aircraft introductions from 1944 to 1982: A dogfight between regression and TFDEA*, “Technological Forecasting & Social Change” 73: 1178–1187, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.013>
- Jacquet-Lagrange E., Siskos J. (1982), *Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making: The UTA method*, “European Journal of Operational Research” 10(2): 151–164, [https://doi.org/10.1016/0377-2217-\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217-(82)90155-2)
- Jasiński L.J. (2007), *Myślenie perspektywiczne. Uwarunkowania badania przyszłości typu foresight*, Instytut Nauk Ekonomicznych PAN, Warszawa
- Jian L., Liu S., Liu Y. (2010), *The Selection of Regional Key Technology Based on the Hybrid Model of Grey Fixed Clustering and Variable Precision Rough Set*, ISTASC’10 Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Systems theory and scientific computation: 54–59

Jing S.-Y, Li G.-L., Zeng K., Pan W., Liu C.-M. (2018), *Efficient parallel algorithm for computing rough set approximation on GPU*, "Soft Computing" 22(22): 7553–7569, <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3050-z>

Johnes J. (2006), *Measuring teaching efficiency in higher education: An application of data envelopment analysis to economics graduates from UK Universities 1993*, "European Journal of Operational Research" 174(1): 443–456, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.044>

Jolly D.R. (2008), *Chinese vs. European views regarding technology assessment: Convergent or divergent?*, "Technovation" 28(12): 818–830, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2008.09.001>

Kaczmarek J. (red.) (2001), *Projektowanie technologii maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź

Kao C., Hwang S.-N. (2008), *Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan*, "European Journal of Operational Research" 185(1): 418–429, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.041>

Kao C., Liu S.T. (2000), *Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis*, "Fuzzy Sets and Systems" 113(3): 427–437, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00137-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00137-7)

Karsak E.E., Ahiska S.S. (2005), *Practical common weight multicriteria decision-making approach with an improved discriminating power for technology selection*, "International Journal of Production Research" 43(8): 1537–1554, <https://doi.org/10.1080/13528160412331326478>

Każmierczak J. (2018), *Ocena społecznych oddziaływań technologii jako wyzwanie współczesności*, referat, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Technicznej Zarządzanie Bezpieczeństwem w Technikach, Technologiach i Polityce Transportowej, 28–30.11.2018, <http://ptot.pl/assets/docs/JK%20MPL%20Pyrzowice%20%202018%20prezentacja.ppt> [29.12.2018]

Keeney R.L., Raiffa H. (1976), *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley & Sons, New York

Kerre E.E. (2011), *The Impact of Fuzzy Set Theory on Contemporary Mathematics (Survey)*, "Applied and Computational Mathematics" 10(1), Special Issue: 20–34, <http://hdl.handle.net/1854/LU-2132584>

- Khouja M. (1995), *The use of data envelopment analysis for technology selection*, "Computers & Industrial Engineering" 28(1): 123–132, [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)00032-1](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)00032-1)
- Kim K., Park K., Seo S. (1997), *A matrix approach for telecommunications technology selection*, "Computers & Industrial Engineering" 33(3–4): 833–836, [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00260-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00260-X)
- Klincewicz K., Jasiński A.H., Manikowski A. (2012), *Przegląd metod i kryteriów rankingowania technologii*, ekspertyza wykonana w ramach Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki”, Radom – Warszawa
- Klincewicz K., Manikowski A. (2013), *Ocena, rankingowanie i selekcja technologii*, Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, <https://doi.org/10.7172/2013.wvwz.13>
- Klusacek K. (2003), *Selection of research priorities – method of critical technologies*, Technology Centre of the CAS, https://www.tc.cz/files/istec_publications/unido-course-critical-technologies-1029-1.pdf [13.07.2013]
- Kononiuk A., Magruk A. (2008), *Przegląd metod i technik badawczych stosowanych w programach foresight*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 28–40
- Kopaliński W. (1983), *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*, Wiedza Powszechna, Warszawa
- Kopczyński M., Grześ T., Stepaniuk J. (2014), *Realizacja algorytmu sekwencyjnego wyznaczania macierzy rozróżnialności zbiorów przybliżonych w układzie FPGA, PAK*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola” 60(5): 321–324, <http://pak.info.pl/index.php?menu=artykulSzczegol&idArtykul=4032> [19.11.2018]
- Kopczyński M., Grześ T., Stepaniuk J. (2016), *Core for Large Datasets: Rough Sets on FPGA*, "Fundamenta Informaticae" 147(2–3): 241–259, <https://doi.org/10.3233/FI-2016-1407>
- Kosieradzka A. (2004), *Metoda wielokryterialnej oceny produktywności*, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” 2, PTZP
- Kosow H., Gaßner R. (2008), *Methods of Future and Scenario Analysis, Overview, Assessment, and Selection Criteria*, "Studies Deutsches Institut für Entwicklungspolitik" 39, Bonn

Kozuń-Cieślak G. (2011), *Wykorzystanie metody DEA do oceny efektywności w usługach sektora publicznego*, „Wiadomości Statystyczne” 3: 14–42, http://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5982/7/4/1/wiadomosci_statystyczne_2011.zip [2.11.2018]

Kryszkiewicz M. (1998), *Rough set approach to incomplete information systems*, “Information Sciences” 112(1–4): 39–49, [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(98\)10019-1](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(98)10019-1)

Kuciński J. (2010), *Podręcznik metodyki foresight dla ekspertów projektu Foresight regionalny dla szkół wyższych Warszawy i Mazowsza „Akademickie Mazowsze 2030”*, Politechnika Warszawska, <http://akademickiemazowsze2030.pl/Data/File/28.pdf> [13.10.2018]

Kumar S.S., Inbarani H.H. (2017), *Covering rough set-based classification for cardiac arrhythmia*, “International Journal of Intelligent Engineering Informatics” 5(2): 101–120, <http://dx.doi.org/10.1504/IJIEI.2017.084167>

Kuncheva L. (1992), *Fuzzy Rough Sets - Application To Feature-Selection*, “Fuzzy Sets And Systems” 51(2): 147–153, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(92\)90187-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90187-9)

Kuo R.J., Su P.Y., Zulvia F.E., Lin C.C. (2018), *Integrating cluster analysis with granular computing for imbalanced data classification problem - A case study on prostate cancer prognosis*, “Computers & Industrial Engineering” 125: 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.031>

Kwon D.S., Cho J.H., Sohn S.Y. (2017), *Comparison of technology efficiency for CO2 emissions reduction among European countries based on DEA with decomposed factors*, “Journal of Cleaner Production” 151: 109–120, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.065>

Laarhoven van P.J.M., Pedrycz W. (1983), *A fuzzy extension of Saaty's priority theory*, “Fuzzy Sets and Systems” 11(1–3): 229–241, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)

Lai X., Liu J.X., Georgiev G. (2016), *Low carbon technology integration innovation assessment index review based on rough set theory - an evidence from construction industry in China*, “Journal of Cleaner Production” 126: 88–96, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.035>

Lamb A., Anderson T.R., Daim T.U. (2010), *Difficulties in R&D Target-Setting Addressed through Technology Forecasting Using Data Envelopment Analysis*, “Technology Management for Global Economic Growth”, PICMET 2010: 1–9

- Larichev O.I., Moskovich H.M. (1995), *ZAPROS-LM – a method and system for ordering multiattribute alternatives*, “European Journal of Operational Research” 82(3): 503–521, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0143-L](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0143-L)
- Larichev O.I. (2000), *Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах (Theory and Methods of Decision Making, Complete with the Fairylands Chronicle)*, Moscow: Logos, 2000
- Lee C., Lee H., Seol H., Park Y. (2012), *Evaluation of new service concepts using rough set theory and group analytic hierarchy process*, “Expert Systems with Applications” 39: 3404–3412, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.028>
- Lee H., Lee C., Seol H., Park Y. (2008), *On the R&D priority setting in technology foresight: a DEA and ANP approach*, “International Journal of Innovation and Technology Management” 5(2): 201–219, <https://doi.org/10.1142/S021987700800133>
- Lee S.K., Mogi G., Hui K.S. (2013), *A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 21: 347–355, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.067>
- Leitner K.-H., Prikoszovits J., Schaffhauser-Linzatti M., Stowasser R., Wagner K. (2007), *The impact of size and specialisation on universities’ department performance: A DEA analysis applied to Austrian universities*, “Higher Education” 53(4): 517–538, <https://doi.org/10.1007/s10734-006-0002-9>
- Lertworasirikul S., Fang S.C., Joines J.A., Nuttle H.L.W. (2003), *Fuzzy data envelopment analysis (DEA): A possibility approach*, “Fuzzy, Sets and Systems” 139: 379–394, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00484-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00484-0)
- Li C., Liu F., Tan X., Du Y. (2010), *A methodology for selecting a green technology portfolio based on synergy*, “International Journal of Production Research” 48(24): 7289–7302, <https://doi.org/10.1080/00207540903382857>
- Li N., Chen K., Kou M. (2017), *Technology foresight in China: Academic studies, governmental practices and policy applications*, “Technological Forecasting and Social Change” 119: 246–255, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.010>
- Li S., Wu C., Zhang H. (2009), *Key technology analysis of implementing lean production*, “IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management” 1–2: 1993–1996, <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2009.5344259>

Liang X., Dijk van M.P. (2016), *Identification of Decisive Factors Determining the Continued Use of Rainwater Harvesting Systems for Agriculture Irrigation in Beijing*, "Water" 8(1), 7, <https://doi.org/10.3390/w8010007>

Lim K.Y., Mandava R. (2018), *A multi-phase semi-automatic approach for multi-sequence brain tumor image segmentation*, "Expert Systems with Applications" 112: 288–300, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.041>

Lin T.Y., Yin P. (2004), *Heuristically Fast Finding of the Shortest Reducts*, w: S. Tsumoto, R. Słowiński, J. Komorowski, J.W. Grzymała-Busse, *Rough Sets and Current Trends in Computing*, RSCTC 2004. "Lecture Notes in Computer Science" 3066, Springer, Berlin, Heidelberg

Liu B. (2004), *Uncertain Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundation*, Springer, Berlin

Liu B., Liu Y.-K. (2002), *Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models*, "IEEE Transactions on Fuzzy Systems" 10(4): 445–450, <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2002.800692>

Liu J.S., Lu L.Y.Y., Lu W.-M., Lin B.J.Y. (2013), *Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey*, "Omega" 41(1): 3–15, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.006>

Liu Y., Sun C., Xu S. (2013), *Eco-Efficiency Assessment of Water Systems in China*, "Water Resource Management" 27(14): 4927–4939, <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0448-3>

Lizut R., *Filozofia techniki: problematyka, nurty, trudności*, <http://sapiencjokracja.pl/filozofia-techniki-problematyka-nurty-trudnosci/> [1.07.2018]

Lolea M.S., Dzitac S. (2018), *A few categories of electromagnetic field problems treated through Fuzzy Logic*, IOP Conf. Series: "Materials Science and Engineering" 294, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012093>

Loveridge D. (1996), *Foresight, Technology Assessment and Evaluation – Synergy or disjunction?*, "Ideas in Progress. Paper" 5, ASTPP meeting, Amsterdam, <https://pdfs.semanticscholar.org/f4a3/c7cf4d7cd17649d257c82d83746693-b7e6a4.pdf> [2.11.2018]

Loveridge D. (2008), *Foresight: The Art and Science of Anticipating the Future*, Routledge

Lowe P. (1995), *Management of Technology: Perception and opportunities*, Chapman and Hall

- Lu W.-G., Huang L.-C., Wang J.-W. (2007), *The new technology evaluation based on Rough-Set theory*, PICMET '07 - 2007 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology: 883–886, <https://doi.org/10.1109/PICMET.2007.4349405>
- Lu Y. (2016), *Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues*, "Journal of Industrial Information Integration" 6: 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Lucheng H., Xin L., Wenguang L. (2010), *Research on emerging technology selection and assessment by technology foresight and fuzzy consistent matrix*, "Foresight" 12(2): 77–89, <https://doi.org/10.1108/14636681011035762>
- Luo J.-L., Hu Z.-H. (2015), *Risk paradigm and risk evaluation of farmers cooperatives' technology innovation*, "Economic Modelling" 44: 80–85, <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.10.024>
- Łucki Z., *Proszę... nie mówmy „technologia” na technikę!*, http://www.uci.agh.edu.pl/bip/63/11_63.htm [1.07.2018]
- Łukasiewicz J., *Pamiętnik*, J. Jadacki (red.) i P. Surma (red.), Wydawnictwo Naukowe Semper, Warszawa 2013, <http://www.jadacki.eu/wp-content/uploads/2018/05/%C5%81ukasiewicz-Pami%C4%99tnik.pdf> [24.07.2018]
- Łunarski J. (2009), *Zarządzenie technologiami. Ocena i doskonalenie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów
- Ma X., Liu Q., Zhan J. (2017), *A survey of decision making methods based on certain hybrid soft set models*, "Artificial Intelligence Review" 47(4): 507–530, <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9490-x>
- Magruk A. (2011), *Innovative classification of technology foresight methods*, "Technological and Economic Development of Economy" 17(4): 700–715, <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2011.649912>
- Magruk A. (2012), *Hybrydowa metodyka badawcza foresightu technologicznego*, autoreferat rozprawy doktorskiej, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, http://www.nazarko.pl/public/data/resource/upload/00003/2464/file/a_magruk_hybrydowa_metodyka_badawcza_foresightu_techologicznego_autoreferat_rozprawy_doktorskiej.pdf [11.07.2018]
- Marco-Serrano F. (2006), *Monitoring managerial efficiency in the performing arts: A regional theatres network perspective*, "Annals of Operations Research" 145(1): 167–181, <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0032-9>

Martin B. (1995), *Foresight in Science and Technology*, "Technology Analysis and Strategic Management" 7(2): 139–168

Martin B.R. (2010), *The origins of the concept of 'foresight' in science and technology: An insider's perspective*, "Technological Forecasting and Social Change", 77(9):1438–1447, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.009>

Mazurkiewicz A., Poteralska B. (2012), *System of a complex assessment of technological innovative solutions*, "Problemy Eksploatacji" 4: 5–21, http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0070-0029/c/Mazurkiewicz_4_2012.pdf [1.11.2018]

Midelfart H., Komorowski J., Norsett K., Yadetie F., Sandvik A.K., Laegreid A. (2002), *Learning rough set classifiers from gene expressions and clinical data*, "Fundamenta Informaticae" 53(2): 155–1832

Miles I. (2008), *From Futures to Foresight w: L. Georghiou, J.C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper (red.)*, *The Handbook of Technology Foresight. Concepts and Practice*, Edward Elgar Publishing Limited, USA

Miles I., Keenan M. (2003), *Overview of methods used in foresight*. The Technology Foresight for Organisers Training Course, Ankara, 2003, United Nations Industrial Development Organisation

Mitchell G.R. (1999), *Global Technology Policies for Economic Growth*, "Technological Forecasting and Social Change" 60(3): 205–214, [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(98\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(98)00044-4)

Mizala A., Romaguera P., Farren D. (2002), *The technical efficiency of schools in Chile*, "Applied Economics" 34(12): 1533–1552, <https://doi.org/10.1080/00036840110103256>

Molodtsov D.A. (1999), *Soft set theory – First results*, "Computers & Mathematics with Applications" 37(4): 19–31, [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00056-5)

Mu W., Kanellopoulos A., Middelaar van C.E., Stilmant D., Bloemhof J.M. (2018), *Assessing the impact of uncertainty on benchmarking the ecoefficiency of dairy farming using fuzzy data envelopment analysis*, "Journal of Cleaner Production" 189: 709–717, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.091>

Mulder K.F., Quist J.N. (red.) (2004), *Technology Assessment: Technology, Society, Sustainability*, Delft University of Technology

- Nalepka A. (red.) (2009), *Organizacje komercyjne i niekomercyjne wobec wzmożonej konkurencji oraz wzrastających wymagań konsumentów*, Wyższa Szkoła Biznesu, Nowy Sącz
- Nambura A., Samay S.K., Edara S.R. (2017), *Soft fuzzy rough set-based MR brain image segmentation*, "Applied Soft Computing" 54: 456–466, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.08.020>
- Nazarko J., Ejdyś J. (red.) (2011), *Metodologia i procedury badawcze w projekcie foresight technologiczny <<NT FOR PODLASKIE 2020>>. Regionalna strategia rozwoju nanotechnologii*, „Rozprawy Naukowe” nr 218, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok
- Nazarko J. (red.), Kędzior Z. (red.) (2010), *Uwarunkowania rozwoju nanotechnologii w województwie podlaskim. Wyniki analiz STEEPVL i SWOT*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, http://ntfp2020.pb.edu.pl/pliki/Uwarunkowania_rozwoju_nanotechnologii_w_wojew%C3%B3dztwie_podlaskim_Wyniki_analiz_STEEPVL_i_SWOT.pdf [16.07.2018]
- Nazarko J., Komuda M., Kuźmich K., Szubzda E., Urban J. (2008), *Metoda DEA w badaniu efektywności instytucji sektora publicznego na przykładzie szkół wyższych*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 4(18): 89–10
- Nazarko J., Magruk A. (red.) (2013), *Kluczowe nanotechnologie w gospodarce Podlasia*, „Rozprawy Naukowe” nr 243, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, http://ntfp2020.pb.edu.pl/pliki/Kluczowe_nanotechnologie_w_gospodarce_Podlasia.pdf [13.07.2018]
- Nazarko J., Šaparauskas J. (2014), *Application of DEA method in efficiency evaluation of public higher education institutions*, "Technological and Economic Development of Economy" 20(1): 25–44, <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.837116>
- Nazarko Ł. (2011), *Istota foresightu i jego percepcja w Polsce*, „Optimum. Studia Ekonomiczne” 4(52): 225–234
- Nazarko Ł. (2015), *Technology Assessment in Construction Sector as a Strategy towards Sustainability*, "Procedia Engineering Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering" – meeting of EURO working group and 15th German – Lithuanian – Polish colloquium (ORSDC): 290–295, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.038>
- Nazarko Ł. (2017), *Future-Oriented Technology Assessment, 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, "Procedia Engineering" 182: 504–509, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.144>

Negoita C.V., Ralescu D.A. (1974), *Multimi vagi si aplicatiile lor. (Ensembles flous et leurs applications)*, Editura Tehnica, Bucuresti

Negoita C.V., Ralescu D.A. (1975), *Fuzzy Sets, L-Sets, Flou Sets*, w: *Application of Fuzzy Sets to System Analysis*, Interdisciplinary Systems Research, Birkhäuser, Basel, s. 12–42, https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5921-9_2

Nemoto J., Goto M. (1999), *Dynamic data envelopment analysis: modeling intertemporal behavior of a firm in the presence of productive inefficiencies*, "Economics Letters" 64(1): 51–56, [https://doi.org/10.1016/S0165-1765\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0165-1765(99)00070-1)

Niewiadomski A. (2013), *Cylindric extensions of interval-valued fuzzy sets in data linguistic summaries*, "Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing" 4(3):369–376, <https://doi.org/10.1007/s12652-011-0098-3>

Ningler M., Stockmanns G., Schneider G., Kochs H.-D., Kochs E. (2009), *Adapted variable precision rough set approach for EEG analysis*, "Artificial Intelligence in Medicine" 47(3): 239–261, <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2009.07.004>

Nowak A. (2013), *Zbiory przybliżone w obszarze systemów ekspertowych*, <http://zsi.tech.us.edu.pl/~anowak/files/pawlak.pdf> [19.11.2018]

Nowak A., *Teoretyczne podstawy zbiorów przybliżonych*, http://zsi.tech.us.edu.pl/~nowak/se/se_rs.pdf [19.11.2019]

Nowicka I. (2004), *Spółeczne przewidywanie*, „Forum Akademickie” 07–08

Olejniczak K. (2008), *Wprowadzenie do zagadnień ewaluacji*, w: K. Olejniczak, M. Kozak, B. Ledzion (red.), *Teoria i praktyka ewaluacji interwencji publicznych: podręcznik akademicki*, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, s. 17–43

Olejniczak K., Kozak M., Ledzion B. (red.) (2008), *Teoria i praktyka ewaluacji interwencji publicznych: podręcznik akademicki*, Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne, Warszawa, http://rszarf.ips.uw.edu.pl/ewalps/teksty/olejniczak_podrecznik.pdf [12.02.2019]

Orłowski C., Czarnecki A. (2007), *Możliwości zastosowania ontologii do oceny technologii informatycznych*, w: R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie*, t. 2, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2007, s. 143–152

Palm E., Hansson S.O. (2006), *The case for ethical technology assessment (eTA)*, "Technological Forecasting & Social Change" 73: 543–558, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.06.002>

- Papagapiou A., Mingers J., Thanassoulis E. (1997), *Would you buy a used car with DEA?*, "OR Insight" 10(1): 13–19
- Pawlak Z. (1982), *Rough sets*, "International Journal of Information and Computer Science" 11: 344–356, <https://doi.org/10.1007/BF01001956>
- Pawlak Z. (1985), *Rough sets and fuzzy sets*, "Fuzzy Sets and Systems" 17(1): 99–102, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(85\)80029-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(85)80029-4)
- Pawlak Z. (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data, System Theory*, "Knowledge Engineering and Problem Solving" 9(1), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3534-4>
- Pawlak Z. (1993), *Rough sets: present state and the future*, "Foundations of Computing and Decision Sciences" 18(3–4): 157–166
- Pawlak Z. (1995), *Zbiory przybliżone. Nowa matematyczna metoda analizy danych*: 1–13, http://bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/1949/zb_przyb.pdf [1.11.2018]
- Pawlak Z. (2004), *Some Issues on Rough Sets*, w: J.F. Peters, A. Skowron, J.W. Grzymala-Busse, B. Kostek, R.W. Świniarski, M.S. Szczuka (red.), *Transactions on Rough Sets I*, "Lecture Notes in Computer Science" vol. 3100, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 1–58, https://doi.org/10.1007/978-3-540-27794-1_1
- Pawlak Z., Grzymala-Busse J., Słowiński R., W. Ziarko (1995), *Rough Sets*, "Communications of the ACM" 38(11): 89–95, <https://doi.org/10.1145/219717.219791>
- Pawlak Z., Marek W. (1984), *Rough sets and information systems*, "Fundamenta Informaticae" 7(1): 105–115
- Pawlak Z., *Rough Sets*, zmodyfikowana wersja wykładów prowadzonych na Uniwersytecie w Tarragona w ramach seminarium na temat języków formalnych i zbiorów przybliżonych w sierpniu 2003 r., <http://bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/2026/RoughSetsRep29.pdf>
- Pawlak Z., Skowron A. (1993), *Rough Membership Functions: A Tool For Reasoning with Uncertainty. Algebraic Methods in Logic and in Computer Science*, "Banach Center Publications" 28(1): 135–150
- Pawlak Z., Skowron A. (2007), *Rough sets: Some extensions*, "Information Sciences" 177: 28–40, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.006>
- Pawlak Z., Skowron A. (2007), *Rudiments of rough sets*, "Information Sciences" 177: 3–27, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.003>

Pawlak Z., Słowiński R. (1994), *Decision analysis using rough sets*, "International Transactions in Operational Research" 1(1): 107–114, <https://doi.org/10.1111/1475-3995.d01-12>

Pawlak Z., Słowiński R. (1994), *Rough Set Approach to Multiattribute Decision-Analysis*, "European Journal of Operational Research" 72(3): 443–459, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90415-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90415-4)

Perez C. (2002), *Technological Revolutions and Financial Capital*, Edward Elgar Publishing

Piegat A. (1999), *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa

Piegat A. (2001), *Fuzzy Modeling and Control*, Springer

Podinovski V.V. (2004), *Bridging the gap between the constant and variable returns-to-scale models: selective proportionality in data envelopment analysis*, "Journal of the Operational Research Society" 55(3): 265–276, <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601691>

Podsiadło M. (2016), *Forecasting Financial Time Series Movements with Rough Sets and Fuzzy Rough Sets*, PhD Thesis, Warsaw University of Technology, Faculty of Electronics and Information Technology Warsaw, <https://depotuw.ceon.pl/bitstream/handle/item/607/dissertationMain.pdf?sequence=1> [26.10.2018]

Popper R. (2008), *Foresight methodology*, w: L. Georghiou, J.C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper (red.), *The Handbook of Technology Foresight. Concepts and Practice*, Edward Elgar Publishing Limited, USA

Popper R. (2008), *How are foresight methods selected?*, "Foresight" 10(6): 62–89, <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>

Popper R. (2009), *Mapping Foresight Revealing how Europe and other world regions navigate into the future*, http://www.forschungsnetzwerk.at/download-pub/2009_efmn_mappingForesight_EU.pdf [8.10.2018]

Popper R., Keenan M., Miles I., Butter M., Sainz G. (2007), *Global Foresight, Outlook 2007. Mapping Foresight in Europe and the rest of the World. Annual Mapping Report*, European Commission, EFNM Network

Popper R., Korte W. (2004), *XTREME EUFORIA: Combining Foresight Methods, EU-US Seminar: New Technology Foresight, Forecasting & Assessment Methods*, Sewilla 13–14.05.2004

- Ported A.L. (1995), *Technology Assessment*, "Impact Assessment" 13(2): 135–151, <https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726087>
- Post T. (2001), *Transconcave data envelopment analysis*, "European Journal of Operational Research" 132(2): 374–389, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00158-2)
- Poteralska B. (2018), *Metodyka wspomagania rozwoju innowacji technologicznych w jednostce badawczej*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom
- Poteralska B., Sacio-Szymańska A. (2008), *Adaptacja algorytmu prowadzenia procesu foresightu technologicznego w jednostkach badawczo-rozwojowych*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 84–95
- Predki B., Słowiński R., Stefanowski J., Susmaga R., Wilk S. (1998), *ROSE - Software Implementation of the Rough Set Theory*, w: L. Polkowski, A. Skowron (red.), *Rough Sets and Current Trends in Computing*, "Lecture Notes in Artificial Intelligence" 1424, Springer-Verlag, Berlin: 605–608
- Predki B., Wilk S. (1999), *Rough Set Based Data Exploration Using ROSE System*, w: Z.W. Ras, A. Skowron (red.), *Foundations of Intelligent Systems*, "Lecture Notes in Artificial Intelligence" 1609, Springer-Verlag, Berlin: 172–180
- Proskuryakova L. (2017), *Energy technology foresight in emerging economies*, "Technological Forecasting and Social Change" 119: 205–210, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.024>
- Radzikowska A.M., Kerre E.E. (2002), *A comparative study of fuzzy rough sets*, "Fuzzy Sets and Systems" 126(2): 137–155, [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(01\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(01)00032-X)
- Radziszewski P., Nazarko J., Vilutiene T., Dębkowska K., Ejdys J., Gudanowska A., Halicka K., Kilon J., Kononiuk A., Kowalski K.J., Król J.B., Nazarko Ł., Sarnowski M. (2016), *Future trends in road pavement technologies development in the context of environmental protection*, "The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering" 11(2): 160–168, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.19>
- Ramanathan R. (2003), *An introduction to Data Envelopment Analysis: a tool for performance measurement*, Sage Publications, New Delhi
- Ramanathan R. (2005), *Operations assessment of hospitals in the Sultanate of Oman*, "International Journal of Operations & Production Management" 25(1): 39–54, <https://doi.org/10.1108/01443570510572231>

Ravi Kumar P., Ravi V. (2007), *Bankruptcy prediction in banks and firms via statistical and intelligent techniques – A review*, “European Journal of Operational Research” 180(1): 1–28, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.043>

Ray S.C. (2004), *Data Envelopment Analysis. Theory and Techniques for Economics and Operations Research*, Cambridge University Press

Rehfuess E.A., Booth A., Brereton L., Burns J., Gerhardus A., Mozygamba K., Oortwijn W., Pfadenhauer L.M., Tummers M., Wilt van der G.-J., Rohwer A. (2018), *Towards a taxonomy of logic models in systematic reviews and health technology assessments: A priori, staged, and iterative approaches*, “Research Synthesis Methods” 9(1): 13–24, <https://doi.org/10.1002/jrsm.1254>

Reichmann G. (2004), *Measuring University Library Efficiency using Data Envelopment Analysis*, “Libri” 54: 136–146, <https://doi.org/10.1515/LIBR.2004.136>

Roblek V., Meško M., Krapež A. (2016), *A complex view of Industry 4.0*, SAGE Open 6(2), <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>

Rogers E.M. (1983), *Diffusion of Innovations*. Third Edition, The Free Press, New York

Roosth S., Silbey S. (2009), *Science and Technology Studies: From Controversies to Posthumanist Social Theory*, <https://doi.org/10.1002/9781444304992.ch23>, w: B.S. Turner, *The New Blackwell Companion to Social Theory*, Blackwell Publishing Ltd., <https://doi.org/10.1002/9781444304992>

Roy B. (1968), *Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)*, “La Revue d’Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)” 8: 57–75

Roy B. (1990), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa

Roy S., Maji P. (2018), *An accurate and robust skull stripping method for 3-D magnetic resonance brain images*, “Magnetic Resonance Imaging” 54: 46–57, <https://doi.org/10.1016/j.mri.2018.07.014>

Saaty T.L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, Mc Graw -Hill, New York

Saaty T.L. (1987), *The analytic hierarchy process—what it is and how it is used*, “Mathematical Modelling” 9(3–5): 161–176, [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

- Saaty T.L. (1996), *Decision making with dependence and feedback. The analytic network process: The Organization and Prioritization of Complexity*, RWS Publications, Pittsburgh
- Sadin S.R., Povinelli F.P., Rosen R. (1989), *The NASA technology push towards future space mission systems*, "Acta Astronautica" 20: 73–77, [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(89\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(89)90054-4)
- Saen R.F. (2009), *Technology selection in the presence of imprecise data, weight restrictions, and nondiscretionary factors*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology" 41(7–8): 827–838, <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1514-5>
- Sambuc R. (1975), *Fonctions φ -floues. Application à l'aide au diagnostic en pathologie thyroïdienne*, PhD thesis, Univ. Marseille, France
- Santarek K. (2016), *Prognozowanie rozwoju nowych technologii*, w: J. Lipski, K. Santarek, A. Świć, W. Piekarski, A. Dudziak, M. Stoma, A. Paszek, P. Wittbrodt, *Innowacyjne technologie w inżynierii produkcji*, Politechnika Lubelska
- Santarek K. (red.), Bagiński J., Buczacki A., Sobczak D., Szerenos A. (2008), *Transfer technologii z uczelni do biznesu. Tworzenie mechanizmów transferu technologii*, PARP, Warszawa, <https://www.parp.gov.pl/files/74/81/194/4372.pdf> [2.07.2018]
- Sengupta J.K. (1992), *A fuzzy systems approach in data envelopment analysis*, "Computers & Mathematics with Applications" 24(8–9): 259–266, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089812219290203T>
- Sengupta J.K. (1992), *Measuring Efficiency by a Fuzzy Statistical Approach*, "Fuzzy Sets and Systems" 46(1): 73–80, [https://doi.org/10.1016/0165-0114-\(92\)90268-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114-(92)90268-9)
- Sexton T.R., Silkman R.H., Hogan A.J. (1986), *Data Envelopment Analysis: Critique and Extensions*, w: R.H. Silkman (red.), *Measuring Efficiency: An Assessment of Data Envelopment Analysis*, Jossey-Bass, <https://doi.org/10.1002/ev.1441>
- Shabani A., Saen R.F., Torabipour S.M.R. (2014), *A new data envelopment analysis (DEA) model to select eco-efficient technologies in the presence of undesirable outputs*, "Clean Technologies and Environmental Policy" 16(3): 513–525, <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0652-0>

Sharma S., Dua A., Singh M., Kumar N., Prakash S. (2018), *Fuzzy rough set based energy management system for self-sustainable smart city*, "Renewable & Sustainable Energy Reviews" 82: 3633–3644, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.099>

Shen K.Y., Tzeng G.H. (2015), *A new approach and insightful financial diagnoses for the IT industry based on a hybrid MADM model*, "Knowledge-Based Systems" 85: 112–130, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.04.024>

Shen L., Loh H.T. (2004), *Applying rough sets to market timing decisions*, "Decision Support Systems" 37(4): 583–597, [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(03\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(03)00089-7)

Shen Y.-C., Lin G.T.R., Tzeng G.-H. (2011), *Coza pomocą Performance using Data Envelopment Analysis (DEA), Service Productivity Management*, Springer, <https://doi.org/10.1007/0-387-33231-6>

Shiau T.-A., Chuen-Yu J.-K. (2016), *Developing an Indicator System for Measuring the Social Sustainability of Offshore Wind Power Farms*, "Sustainability" 8 (5), 470, <https://doi.org/10.3390/su8050470>

Shiraz R.K., Charles V., Jalalzadeh L. (2014), *Fuzzy rough DEA model: A possibility and expected value approaches*, "Expert Systems with Applications" 41(2): 434–444, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.069>

Shiraz R.K., Fukuyama H., Tavana M., Di Caprio D. (2016), *An integrated data envelopment analysis and free disposal hull framework for cost-efficiency measurement using rough sets*, "Applied Soft Computing" 46: 204–219, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.043>

Shuai J.J., Li H.L. (2005), *Using Rough Set and Worst Practice DEA in Business Failure Prediction*, w: D. Ślęzak, J. Yao, J.F. Peters, W. Ziarko, X. Hu (red.), *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing*, RSFDGrC, "Lecture Notes in Computer Science" 3642, Springer, Berlin, Heidelberg, 503–510, https://doi.org/10.1007/11548706_53.

Silva Portela M.C.A., Thanassoulis E. (2001), *Decomposing school and school type efficiency*, "European Journal of Operational Research" 132(2): 357–373, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00157-0)

Skowron A., J. Stepaniuk (1996), *Tolerance approximation spaces*, "Fundamenta Informaticae" 27(2/3): 245–253, <https://doi.org/10.3233/FI-1996-272311>

- Słowiński R., Zopounidis C. (1995), *Application of the rough set approach to evaluation of bankruptcy risk*, "International Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management" 4(1): 27–41, <https://doi.org/10.1002/j.1099-1174.1995.tb00078.x>
- Słowiński R., Zopounidis C., Dimitras A.I. (1997), *Prediction of company acquisition in Greece by means of the rough set approach*, "European Journal of Operational Research" 100(1): 1–15, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217-\(96\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217-(96)00110-5)
- Solow R.M. (1956), *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, "The Quarterly Journal of Economics" 70(1): 65–94, <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Song L., Jin S. (2015), *Production performance evaluation based on rough set theory and wavelet neural network*, "Journal of Intelligent & Fuzzy Systems" 29: 2429–2437, <https://doi.org/10.3233/IFS-151943>
- Song X. (2018), *Analysis for Capital Investment Efficiency in Higher Education of Northeast China Based on DEA Model*, "Educational Sciences-Theory & Practice" 18(6): 3202–3208, <https://doi.org/10.12738/estp.2018.6.223>
- Stabryła A. (2010), *Koncepcje zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem*, Mfiles.pl, seria wydawnicza Encyklopedia Zarządzania
- Stankiewicz P. (2015), *Klasyczna i partycypacyjna ocena technologii*, w: M. Gwiazdowicz, P. Stankiewicz (red.), *Technology Assessment. Problematyka oceny technologii*, „Studia Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 3(43): s. 35–54
- Stewart T.J. (1994), *Data Envelopment Analysis and Multiple Criteria Decision Making: a Response*, "Omega" 22(2): 205–206, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(94\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0305-0483(94)90079-5)
- Stewart T.J. (1996), *Relationships between DEA and MCDM*, "Journal of the Operational Research Society" 47(5): 654–665, <https://doi.org/10.1057/jors.1996.77>
- Stiegler B. (1998), *Technics and Times, 1. The fault of Epimetheus*, Stanford University Press, Stanford
- Stirling A., Leach M., Mehta L., Scoones I., Smith A., Stagl S., Thompson J. (2007), *Empowering Designs: towards more progressive appraisal of sustainability*, "STEPS Working Paper 3", STEPS Centre, Brighton, http://steps-centre.org/wp-content/uploads/final_steps_design1.pdf [1.12.2018]

Stock T., Seliger G. (2016), *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0*, "Procedia CIRP" 40: 536–541, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>

Strąkowski T. (2008), *Algorytmy równoległe na potrzeby Zbiorów Przybliżonych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Sueyoshi T., Goto M. (2014), *Environmental assessment for corporate sustainability by resource utilization and technology innovation: DEA radial measurement on Japanese industrial sectors*, "Energy Economics" 46: 295–307, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.021>

Szczuko P., Kostek B. (2015), *Sztuczna inteligencja w medycynie*. Skrypt do projektu z przedmiotu, Politechnika Gdańska, międzywydziałowy kierunek inżynieria biomedyczna, https://sound.eti.pg.gda.pl/student/sim/instrukcja_projekt.pdf [12.10.2018]

Szewczyk R. (red.), Mieczkowski K., Missala T., Lichodziejewski C., Andrzejczak M., Bukała A., Winiarski W., Pietruszyńska K., Rzeplińska-Rykała K., Zbińkowska D., Komorowska M., Roszkowski K. (2008), *Foresight województwa mazowieckiego: krzyżowa analiza wpływów, scenariusze rozwoju, priorytetowe technologie*, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa

Ślęzak D. (2006), *Association Reducts: Complexity and Heuristics*, w: S. Greco, Y. Hata, S. Hirano, M. Inuiguchi, S. Miyamoto (red.), *Proceedings of the 5th International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing (RSCTC'06)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg: 157–164, http://dx.doi.org/10.1007/11908029_1

Świniarski R.W., Skowron A. (2003), *Rough set methods in feature selection and recognition*, "Pattern Recognition Letters" 24(6), 833–849, [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(02\)00196-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(02)00196-4)

Taylor B., Harris G. (2004), *Relative efficiency among South African universities: a data envelopment analysis*, "Higher Education" 47(1): 73–89, <https://doi.org/10.1023/B:HIGH.0000009805.98400.4d>

Thanassoulis E., Dyson R.G. (1992), *Estimating Preferred Target Input-Output Levels Using Data Envelopment Analysis*, "European Journal of Operational Research" 56(1): 80–97, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90294-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90294-J)

Tofallis C. (1996), *Improving discernment in DEA using profiling*, "Omega" 24(3): 361–364, [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00065-8)

- Tohidi G., Valizadeh P. (2011), *A Non-Radial Rough DEA Model*, "International Journal of Mathematical Modelling & Computation" 1(4): 257–261
- Tran T.A., Daim T. (2008), *A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment*, "Technological Forecasting and Social Change" 75(9): 1396–1405, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2008.04.004>
- Trzaskalik T. (2014), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria: „Organizacja i Zarządzanie” 74(1921): 239–263
- Trzaskalik T. (2016), *Modelowanie preferencji w wielokryterialnych dyskretnych problemach decyzyjnych – przegląd bibliografii*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 426: 214–225, <https://doi.org/10.15611/pn.2016.426.22>
- Trzaskalik T. (red.) (2014), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Metody i zastosowania*, PWE
- Tsai Y.-H., Lai W.-H., Chang P.-L., Watada J. (2009), *Dilemma of Behavioral Uncertainty of R&D Alliance in Taiwan Machinery Industry*, "IEEE International Conference On Fuzzy Systems" 1–3: 439–1444, <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2009.5277145>
- Tsumoto S. (1998), *Automated extraction of medical expert system rules from clinical databases based on rough set theory*, "Information Sciences" 112(1–4): 67–84, [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(98\)10021-X](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(98)10021-X)
- Tsumoto S. (2004), *Mining diagnostic rules from clinical databases using rough sets and medical diagnostic model*, "Information Sciences" 162(2): 65–80, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2004.03.002>
- Ubukata S., Umado K., Notsu A., Honda K. (2018), *Characteristics of Rough Set C-Means Clustering*, "Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics" 22(4): 551–564, <https://doi.org/10.20965/jaciii.2018.p0551>
- Wad A., Radnor M. (1984), *Technology assessment: review and implications for developing countries*, "Science policy studies and documents" 61, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO
- Walley P. (1991), *Statistical reasoning with imprecise probabilities*, Chapman and Hall/CRC, [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(00\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(00)00031-1)

Wang C.-H., Chin Y.-C., Tzeng G.-H. (2010), *Mining the R&D innovation performance processes for high-tech firms based on rough set theory*, "Technovation" 30(7-8): 447-458, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.11.001>

Wang X., Jia F., Wang Y. (2015), *Evaluation of Clean Coal Technologies in China: Based on Rough Set Theory*, "Energy & Environment" 26 (6-7): 985-995, <https://doi.org/10.1260/0958-305X.26.6-7.985>

Wang Y.F. (2003), *Mining stock price using fuzzy rough set system*, "Expert Systems with Applications" 24(1):13-23, [https://doi.org/10.1016/S0957-4174-\(02\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0957-4174-(02)00079-9)

Weichbroth P., Orłowski C. (2009), *Przegląd miar oceny oprogramowania*, w: W. Chmielarz, T. Parys (red.), *Technologie informacyjne dla społeczeństwa*, Wyższa Szkoła Ekonomiczno-Informatyczna, Exit, Warszawa, s. 275-284 http://www.academia.edu/9674920/Przeegl%C4%85d_miar_oceny_oprogramowania [1.1.2019]

Wen M. (2015), *Uncertain Data Envelopment Analysis*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43802-2>

Wiench P. (2008), *Foresight w kontekście kultury technicznej*, „Nauka i Szkolnictwo Wyższe” 2(32): 110-117, <https://pressto.amu.edu.pl/index.php/nsw/article/viewFile/4836/4938> [17.07.2018]

Wróblewski J. (1998), *Genetic Algorithms in Decomposition and Classification Problems*, w: L. Polkowski A. Skoworn (red.), *Rough Sets in Knowledge Discovery 2*, "Studies in Fuzziness and Soft Computing 19. Physica", Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1883-3_24

Wu C., Yue Y., Li M., Adjei O. (2004), *The rough set theory and applications*, "Engineering Computations" 21(5): 488-511, <https://doi.org/10.1108/02644400410545092>

Wu H.-Y., Lin H.-Y. (2012), *A hybrid approach to develop an analytical model for enhancing the service quality of e learning*, "Computers & Education" 58(4): 1318-1338, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.12.025>

Wu S.X., Li M.Q., Huang W.T., Liu S.F. (2004), *An improved heuristic algorithm of attribute reduction in rough set*, "Journal of System Sciences and Information" 2(3): 557-562, <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2005.1527482>

Wyk van R.J. (2009), *Technology assessment for portfolio managers*, "Technovation" 30(4): 223-228, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.06.005>

- Xu J., Li B., Wu D. (2009), *Rough data envelopment analysis and its application to supply chain performance evaluation*, "International Journal of Production Economics" 122(2): 628–638, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.026>
- Xu N., Zhang Y., Yu Y. (2007), *A Simple Reduction Analysis and Algorithm Using Rough Sets*, w: M. Kryszkiewicz, J.F. Peters, H. Rybinski, A. Skowron (red.), *Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms*, RSEISP 2007. "Lecture Notes in Computer Science" 4585, Springer, Berlin, Heidelberg
- Yang C., Lu W.-M. (2006), *Performance Benchmarking for Taiwan's International Tourist Hotels*, "INFOR" 44(3): 229–245, <https://doi.org/10.1080/03155986.2006.11732750>
- Yang C.-C. (2014), *An enhanced DEA model for decomposition of technical efficiency in banking*, "Annals of Operations Research" 214(1): 167–185, <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0926-z>
- Yao Y.Y. (1997), *Combination of Rough and Fuzzy Sets Based on α -Level Sets*, w: T.Y. Lin, N. Cercone (red.), *Rough Sets and Data Mining*, Springer, Boston MA, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1461-5_15
- Yu P., Lee J.H. (2013), *A hybrid approach using two-level SOM and combined AHP rating and AHP/DEA-AR method for selecting optimal promising emerging technology*, "Expert System with Applications" 40: 300–314, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.043>
- Zacher L. (2016), *Technology and a New International Distribution of Power*, w: M. Szkarlat, K. Mojska (red.), *New Technologies as a Factor of International Relations*, Cambridge Scholars Publishing, s. 35–52.
- Zadeh L.A. (1965), *Fuzzy sets, A Aristotle's Syllogistic from the Standpoint of Modern Formal Logic*, "Information and Control" 8(30): 338–353, [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zadeh L.A. (1973), *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*, "IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics" 3(1): 28–44, <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- Zadeh L.A. (1975), *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I*, "Information Sciences" 8(3), 199–249, [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
- Zavadskas E., Turskis Z. (2011), *Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Methods in Economics: An Overview*, "Technological and Economic Development of Economy" 17(2): 397–427, <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>

Zeng X.T., Huang G.H., Yang X.L., Wang X., Fu H., Li Y.P., Li Z. (2016), *A developed fuzzy-stochastic optimization for coordinating human activity and eco-environmental protection in a regional wetland ecosystem under uncertainties*, "Ecological Engineering" 97: 207–230, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.09.002>

Zhang Q., Xie Q., Wang G. (2016), *A survey on rough set theory and its applications*, "CAAI Transactions on Intelligence Technology" 1(4): 323–333, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trit.2016.11.001>

Zhang W.-R. (1994), *Bipolar fuzzy sets and relations: a computational framework for cognitive modeling and multi-agent decision analysis*, w: Proceedings of the 1st Int. Joint Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS/IFIS/NASAO): 305–309, <https://doi.org/10.1109/IJCF.1994.375115>

Zhang Y., Ye S., Ding W. (2017), *Based on rough set and fuzzy clustering of MRI brain segmentation*, "International Journal of Biomathematics" 10(2): 1750026, <https://doi.org/10.1142/S1793524517500267>

Zhang Z., Shi Y., Gao G. (2009), *A rough set-based multiple criteria linear programming approach for the medical diagnosis and prognosis*, "Expert Systems with Applications" 36(5): 8932–8937, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.007>

Zheng Z., Zhang X., Xu H., Liang W., Zheng S., Shi Y. (2018), *A Unified Level Set Framework Combining Hybrid Algorithms for Liver and Liver Tumor Segmentation in CT Images*, "Biomed Research International": 3815346, <https://doi.org/10.1155/2018/3815346>

Zhong N., Dong J., Ohsuga S. (2001), *Using Rough Sets with Heuristics for Feature Selection*, "Journal of Intelligent Information Systems" 16(3): 199–214, <https://doi.org/10.1023/A:1011219601502>

Zhu J. (2003), *Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking: Data Envelopment Analysis with Spreadsheets and DEA Excel Solver*, Springer

Zhu J. (1996), *Data Envelopment Analysis with Preference Structure*, "Journal of the Operational Research Society" 47(1): 136–150, <https://doi.org/10.1057/jors.1996.12>

Ziarko W. (1993), *Variable precision rough set model*, "Journal of Computer and System Sciences" 46(1): 39–59, [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(93\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0022-0000(93)90048-2)

Zimmermann H.-J. (2001), *Fuzzy Set Theory – and Its Applications*. Fourth Edition, Springer Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0646-0>

Zopounidis C., Doumpos M. (2002), *Multicriteria classification and sorting methods: A literature review*, "European Journal of Operational Research" 138(2): 229–246, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00243-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00243-0)

Portale informacyjne, strony internetowe, dokumenty elektroniczne

Australia 2030: navigating our uncertain future, 2016. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), https://www.csiro.au/~~/media/Do-Business/Files/Futures/FUTURES_Australia2030_Report_web.pdf?la=en&hash=9612D5EC9C7998DC660269E1BDCE4F52B512C9E7 [13.07.2018];

Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl> [2.07.2018]

GUS, *Definicje pojęć z zakresu statystyki nauki i techniki*, <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/> [14.10.2018]

Internetowa encyklopedia Governica, <https://www.governica.com> [15.10.2018]

Internetowa encyklopedia zarządzania, <https://mfiles.pl/pl/> [15.10.2018]

OECD (2001), *Measuring Productivity. Measurement of aggregate and industry-level productivity growth*, OECD, Paris, <http://www.oecd.org/dataoecd/59/29/2352458.pdf> [2.07.2018]

Online Business Dictionary, <http://www.businessdictionary.com> [12.01.2019]

Pilotażowe badania typu foresight (2012), Biuletyn informacyjny MCIG, <http://innowacyjnaradomka.pl/wp-content/uploads/2012/09/Pilota%C5%BCowe-badania-typu-foresight.pdf> [14.10.2018]

Programu studiów nad nauką, technologią i społeczeństwem Szkoły Administracji Publicznej im. Johna F. Kennedy’ego na Uniwersytecie Harvarda (The Program on Science, Technology and Society at Harvard University’s John F. Kennedy School of Government), <http://sts.hks.harvard.edu/about/whatissts.html> [1.01.2019]

PWN-OXFORD University Press, <https://oxford.pwn.pl> [1.09.2018]

Rose 2 User’s Guide, http://idss.cs.put.poznan.pl/site/fileadmin/projects-images/rose_manual.pdf [10.08.2018]

Słownik angielski, Linguee, <https://www.linguee.com> [12.01.2019]

Słownik języka angielskiego, Cambridge, <https://dictionary.cambridge.org> [12.01.2019]

Słownik języka polskiego, (red.) W. Doroszewski, Warszawa 1958–1968, <http://doroszewski.pwn.pl> [2.07.2018]

Słownik języka polskiego, <https://sjp.pwn.pl> [2.07.2018]

Słownik online bab.la, <https://pl.bab.la> [12.01.2019]

Strona internetowa Narodowego Programu Foresight, <http://kbn.icm.edu.pl/foresight/> [2.07.2018]

Strona internetowa projektu «NT FOR Podlaskie 2020», <http://ntfp2020.pb.edu.pl/pl/cms/view/article/id/20/title/O%2Bprojekcie> [5.08.2018]

Strona internetowa Zakład Inteligentnych Systemów Wspomagania Decyzji, Instytut Informatyki, Politechniki Poznańskiej, <http://idss.cs.put.poznan.pl/site/rose.html> [10.08.2018]

Strona internetowa: „Priorytetowe technologie dla zrównoważonego rozwoju województwa świętokrzyskiego” prowadzonego w ramach Sektorowego Programu Operacyjnego „Wzrost konkurencyjności przedsiębiorstw”, nr WKP_1/1.4.5/2/2006/20/23/601/2006/U, <http://www.tu.kielce.pl/foresight/zalozenia.html> [15.10.2018]

Technology Assessment in Europe; Between Method and Impact (TAMI), Final report of the TAMI project, 2004, https://www.ta-swiss.ch/2004_TAMIfinalreport_e.pdf [2.11.2018]

The European Commission's science and knowledge service, Online Foresight Guide JRC – IPTS, http://forlearn.jrc.ec.europa.eu/guide/4_methodology/meth_modelling.htm [15.10.2018]

UNIDO (2008), *Foresight technologiczny, podręcznik*, t. 1, *Organizacja i metody*, UNIDO-PARP, Warszawa, https://www.parp.gov.pl/images/PARP_publications/pdf/2007_for_tech_t1e3r45ju76.pdf [2.07.2018]

UNIDO (2005), *Technology Foresight Manual*, vol. 1, *Organization and Methods*, UNIDO, Vienna, [https://open.unido.org/api/documents/4788327/download/UNIDO%20TECHNOLOGY%20FORESIGHT%20MANUAL.%20VOLUME%201%20-%20ORGANIZATION%20AND%20METHODS%20\(23148.en\)](https://open.unido.org/api/documents/4788327/download/UNIDO%20TECHNOLOGY%20FORESIGHT%20MANUAL.%20VOLUME%201%20-%20ORGANIZATION%20AND%20METHODS%20(23148.en)) [16.07.2018]

Wielki słownik języka polskiego, <http://wsjp.pl> [12.01.2019]

Wikipedia, <https://pl.wikipedia.org> [12.01.2019]

WIPO (2018). *World Intellectual Property Indicators*, World Intellectual Property Organization, Geneva, https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_941_2018.pdf [1.12.2018]

Spis tabel

Tabela. „Ocena” i terminy bliskoznaczne	8
Tabela 1.1. Zbiory przybliżone w zadaniach oceny technologii.....	33
Tabela 1.2. Metoda DEA w zadaniach oceny technologii	36
Tabela 1.3. Metody stosowane w ocenie technologii.....	40
Tabela 1.4. Struktura danych priorytetyzacji.....	44
Tabela 1.5. Metody etapów priorytetyzacji technologii	48
Tabela 3.1. Przykładowe etapy oceny i wyboru technologii	101
Tabela 3.2. Modelowanie niepewności lingwistycznej	103
Tabela 4.1. Lista rozważanych technologii w projekcie «NT FOR Podlaskie 2020».....	112
Tabela 4.2. Zestawienie kryteriów atrakcyjności.....	116
Tabela 4.3. Zestawienie kryteriów wykonalności.....	117
Tabela 4.4. Lista kluczowych technologii na podstawie średniej z uwzględnieniem poziomu wiedzy ankietowanych oraz bez uwzględnienia.....	120
Tabela 4.5. Rankingi technologii na podstawie modeli SE-DEA przy 21 kryteriach atrakcyjności i wykonalności	123
Tabela 4.6. Macierz korelacji Pearsona kryteriów atrakcyjności (dane nieważone)	126
Tabela 4.7. Macierz korelacji Pearsona kryteriów wykonalności (dane nieważone)	127
Tabela 4.8. Macierz korelacji kryteriów atrakcyjności (dane ważne)	128
Tabela 4.9. Macierz korelacji kryteriów wykonalności (dane ważne)	129
Tabela 4.10. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane bez uwzględnienia wiedzy) – atrybuty jądra i reduktów.....	130
Tabela 4.11. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane bez uwzględnienia wiedzy) – rankingi metody DEA dla wybranych reduktów	131
Tabela 4.12. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane z uwzględnienia wiedzy) – atrybuty jądra i reduktów.....	134
Tabela 4.13. Rozważania etapu redukcji kryteriów (dane z uwzględnieniem wiedzy) – rankingi metody DEA dla wybranych reduktów	135

Tabela 4.14. Technologie wskazywane jako efektywne dla zredukowanego zbioru danych ważonych wiedzą ekspercką i nieważonych.....	137
Tabela 4.15. Korelacja Kendalla dla rankingów wyznaczonych metodą DEA.....	140
Tabela 4.16. Korelacja Spearmana dla rankingów wyznaczonych metodą DEA.....	140
Tabela 4.17. Nominalny współczynnik dyspersji dla kryteriów atrakcyjności.....	141
Tabela 4.18. Nominalny współczynnik dyspersji dla kryteriów wykonalności.....	143
Tabela 4.19. Wyniki hybrydowego modelu przy różnych poziomach zaufania (dane nieważone).....	148
Tabela 4.20. Wyniki hybrydowego modelu przy różnych poziomach zaufania (dane ważne).....	155

Spis rysunków

Rysunek. Technologie i wybrane obszary ludzkiej aktywności.....	5
Rysunek 1.1. Hierarchia nauki, technologii, <i>know-how</i> , sztuki przemysłowej i rzemiosła.....	18
Rysunek 1.2. Koncepcje zorientowanej na przyszłość oceny technologii.....	20
Rysunek 1.3. Dynamika zmian liczby publikacji z obszaru analizy i oceny technologii.....	27
Rysunek 1.4. Procedura priorytetyzacji technologii.....	47
Rysunek 1.5. Wykresy decyzyjne priorytetyzacji dwuwymiarowej.....	52
Rysunek 1.6. Techniki pracy ekspertów.....	53
Rysunek 2.1. Zbiór przybliżony i jego aproksymacja	62
Rysunek 2.2. Zbiór przybliżony i jego aproksymacja: a) zbiór całkowicie niedefiniowalny, b) wewnątrznie B-niedefiniowalny i c) B-definiowalny	64
Rysunek 2.3. Wybrane funkcje przynależności: a) trójkątna, b) Gaussowska.....	65
Rysunek 2.4. Ilustracja funkcji przynależności w zbiorach przybliżonych a) $\mu(x)=0$, b) $0 \leq \mu(x) \leq 1$, c) $\mu(x)=1$	66
Rysunek 2.5. Efektywność zorientowana na nakłady i wyniki (jeden nakład i wynik, stałe efekty skali).....	74
Rysunek 2.6. Koncepcja oceny technologii za pomocą DEA uwzględniająca niepożądane efekty i czynniki niekontrolowane	75
Rysunek 2.7. Granica efektywności – przypadek dwóch wyjść i pojedynczego wejścia	76
Rysunek 2.8. Granica efektywności modelu: a) DEA i b) SE-DEA – przypadek dwóch wyjść	84
Rysunek 3.1. Zaufanie Tr dla zmiennej $\xi = ([a,b],[c,d])$ oraz $c \leq a < b \leq d$: a) $\text{Tr}\{\xi \geq r\}$, b) $\text{Tr}\{\xi \leq r\}$	89
Rysunek 3.2. Koncepcja granicy efektywności: a) BCC DEA i b) BCC DEA dla zmiennych przybliżonych	91
Rysunek 3.3. Algorytm wyznaczania reduktów.....	94
Rysunek 3.4. Algorytm wyznaczania reduktów macierzy nierozróżnialności ..	96

Rysunek 3.5. Algorytm wyznaczania reduktów z macierzy	97
Rysunek 3.6. Proces oceny, rankingowania i selekcji technologii	99
Rysunek 3.7. Schemat procesu priorytetyzacji technologii z wykorzystaniem hybrydowego modelu	106
Rysunek 4.1. Schemat procesu badawczego «NT FOR Podlaskie 2020» Regionalna strategia rozwoju nanotechnologii	117
Rysunek 4.2. Wykres atrakcyjności i wykonalności ważonej deklarowanym poziomem wiedzy ekspertów	119
Rysunek 4.3. Wykres atrakcyjności i wykonalności bez uwzględnienia wiedzy eksperckiej	119
Rysunek 4.4. Wyniki metody DEA dla 21 kryteriów z uwzględnieniem wiedzy eksperckiej i bez niej.....	122
Rysunek 4.5. Wyniki metody DEA dla zredukowanego zbioru kryteriów z uwzględnieniem wiedzy eksperckiej i bez niej.....	139
Rysunek 4.6. Górne i dolne przybliżenie kryterium W1 (dane nieważone)....	145
Rysunek 4.7. Górne i dolne przybliżenie kryterium W2 (dane nieważone)....	145
Rysunek 4.8. Górne i dolne przybliżenie kryterium W7 (dane nieważone)....	146
Rysunek 4.9. Górne i dolne przybliżenie kryterium A4 (dane nieważone)	146
Rysunek 4.10. Górne i dolne przybliżenie kryterium A5 (dane nieważone) ..	147
Rysunek 4.11. Górne i dolne przybliżenie kryterium A7 (dane nieważone) ..	147
Rysunek 4.12. Górne i dolne przybliżenie kryterium A9 (dane nieważone) ..	148
Rysunek 4.13. Ilustracja obliczeń z zastosowaniem modelu SE-DEA dla zmiennych przybliżonych – dane nieważone, $\alpha=0,5$, $\alpha=0,6$, $\alpha=0,8$	150
Rysunek 4.14. Górne i dolne przybliżenie kryterium W1 (dane ważne)	151
Rysunek 4.15. Górne i dolne przybliżenie kryterium W2 (dane ważne)	151
Rysunek 4.16. Górne i dolne przybliżenie kryterium W3 (dane ważne)	152
Rysunek 4.17. Górne i dolne przybliżenie kryterium W7 (dane ważne)	152
Rysunek 4.18. Górne i dolne przybliżenie kryterium A1 (dane ważne).....	153
Rysunek 4.19. Górne i dolne przybliżenie kryterium A2 (dane ważne).....	153
Rysunek 4.20. Górne i dolne przybliżenie kryterium A3 (dane ważne).....	154
Rysunek 4.21. Górne i dolne przybliżenie kryterium A9 (dane ważne).....	154
Rysunek 4.22. Ilustracja obliczeń z użyciem modelu SE-DEA dla zmiennych przybliżonych – dane ważne, $\alpha=0,5$, $\alpha=0,6$, $\alpha=0,8$	157

Załączniki

Załącznik 1. Wartości kryteriów wykonalności (odwrócone, dane nieważone)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T1	3,105	2,895	2,684	3,053	3,053	3,263	3,105	3,053
T2	3,368	3,263	2,947	3,263	3,211	3,474	3,526	3,211
T3	3,158	2,789	2,632	3,105	3,158	3,158	2,895	2,421
T4	3,105	2,684	2,737	3,053	3,053	3,105	2,789	2,632
T5	2,737	2,789	2,895	3,053	3,105	3,368	3,105	2,842
T6	3,000	3,053	3,158	3,316	3,316	3,474	3,368	3,263
T7	2,895	2,895	3,105	3,158	3,211	3,421	3,316	3,053
T8	2,842	2,737	2,579	2,895	3,000	3,211	2,947	2,684
T9	2,895	3,053	3,211	3,105	3,158	3,421	3,368	3,421
T10	3,000	2,947	3,053	3,316	3,211	3,421	3,263	3,263
T11	2,789	2,737	2,632	3,105	3,158	3,316	3,105	2,789
T12	2,842	2,895	2,737	3,316	3,263	3,368	2,947	2,789
T13	2,789	2,789	2,947	3,211	3,211	3,368	3,053	3,000
T14	2,842	2,947	3,000	3,053	3,000	3,263	3,316	3,053
T15	2,947	3,105	3,316	3,263	3,158	3,368	3,368	3,263
T16	2,526	2,474	2,474	2,737	2,632	2,895	2,842	2,684
T17	2,474	2,474	2,474	2,737	2,684	2,632	2,368	2,368
T18	2,789	2,789	2,684	2,842	2,737	2,842	2,632	2,895
T19	2,632	2,789	2,895	3,053	3,053	3,158	2,947	2,737
T20	2,579	2,368	2,211	2,737	2,684	2,737	2,579	2,263
T21	2,632	2,474	2,263	2,632	2,684	2,684	2,526	2,211
T22	2,842	2,737	2,526	2,947	2,947	3,000	2,947	2,684
T23	2,684	2,526	2,474	2,737	2,842	3,105	2,737	2,316
T24	2,632	2,579	2,263	2,789	2,737	2,947	2,737	2,368
T25	2,684	2,632	2,474	2,947	2,842	2,947	2,737	2,368
T26	2,947	3,053	2,789	3,000	2,947	3,105	3,000	2,632
T27	2,632	2,842	2,579	2,895	2,737	3,000	3,000	2,632
T28	2,895	2,947	2,947	3,211	3,211	3,211	3,211	2,895

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T29	3,053	3,053	2,947	3,263	3,211	3,421	3,316	2,737
T30	2,737	2,737	2,737	3,263	3,158	3,263	2,842	2,579
T31	2,632	2,526	2,474	2,947	2,895	2,947	2,737	2,316
T32	2,895	3,000	2,842	3,211	3,263	3,316	3,263	3,000
T33	2,737	2,632	2,684	3,211	3,000	3,105	2,737	2,579
T34	2,842	2,947	2,895	3,316	2,842	2,947	2,947	2,947
T35	2,895	3,053	3,211	3,421	3,316	3,421	3,105	2,842
T36	2,842	2,895	2,842	3,158	3,000	3,158	2,842	2,684
T37	2,947	3,000	2,684	2,895	2,842	2,947	3,105	2,632
T38	2,947	3,000	2,895	2,947	3,000	3,158	3,211	2,737
T39	2,789	2,789	3,316	3,474	3,316	3,579	3,105	2,947
T40	2,632	2,947	3,158	3,421	3,263	3,368	3,211	2,947
T41	3,053	3,263	3,368	3,579	3,474	3,632	3,316	3,105
T42	2,684	2,789	2,737	3,158	3,053	3,211	2,842	2,579
T43	2,684	2,895	3,000	3,421	3,316	3,474	3,211	2,947
T44	2,684	2,737	2,842	3,158	3,105	3,368	3,263	2,842
T45	2,737	2,789	2,684	3,053	2,947	3,105	3,000	2,421
T46	2,842	2,947	3,211	3,263	3,211	3,474	3,053	2,947
T47	2,842	2,842	3,158	3,368	3,368	3,579	3,211	3,105
T48	2,842	2,895	3,105	3,368	3,263	3,526	3,211	3,158
T49	3,000	3,316	3,053	3,368	3,158	3,263	3,421	3,053
T50	3,000	3,368	3,211	3,421	3,368	3,474	3,474	3,263
T51	2,895	3,158	3,158	3,368	3,263	3,368	3,316	3,211
T52	3,316	3,579	3,632	3,632	3,526	3,789	3,789	3,526
T53	3,105	3,158	3,105	3,421	3,211	3,474	3,368	2,947
T54	3,211	3,368	3,526	3,421	3,316	3,526	3,684	3,474
T55	3,526	3,684	3,684	3,579	3,474	3,632	3,842	3,368
T56	3,263	3,526	3,474	3,579	3,368	3,632	3,579	3,316
T57	3,000	3,211	2,895	3,211	3,105	3,316	3,105	2,842

Załącznik 2. Wartości kryteriów atrakcyjności (dane nieważone)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
T1	3,263	3,158	3,079	3,211	3,263	3,263	3,474	3,105	3,158	3,105	3,263	3,053	3,421
T2	2,842	2,737	3,132	2,684	3,053	3,105	3,053	2,737	2,947	3,053	2,947	2,895	3,053
T3	3,211	2,947	3,132	3,474	3,579	2,947	3,316	2,842	3,263	3,158	3,526	3,158	3,316
T4	3,579	3,474	3,553	3,737	3,737	3,368	3,789	3,316	3,789	3,579	4,000	3,421	3,526
T5	3,316	3,053	3,789	3,053	3,053	3,368	3,579	2,789	3,421	3,421	2,684	3,368	3,579
T6	3,158	2,684	3,421	2,947	3,053	3,474	3,421	2,579	3,158	3,263	2,579	3,263	3,158
T7	3,105	2,737	3,368	2,947	3,053	3,474	3,474	2,684	3,158	3,263	2,579	3,263	3,211
T8	3,526	3,263	3,421	3,632	3,368	3,526	3,789	3,211	3,842	3,842	3,053	3,579	3,579
T9	3,263	2,789	3,316	2,632	3,000	3,632	3,526	2,842	3,421	3,263	2,684	3,421	3,368
T10	3,158	2,842	3,263	2,737	3,158	3,368	3,316	2,737	3,158	3,105	2,474	3,211	3,158
T11	3,211	2,895	3,421	2,895	3,105	3,421	3,368	2,947	3,158	3,211	2,684	3,368	3,105
T12	3,421	3,000	3,579	2,947	3,211	3,421	3,474	2,895	3,368	3,263	2,737	3,368	3,105
T13	3,263	2,842	3,421	2,684	3,158	3,526	3,368	2,684	3,105	3,316	2,632	3,263	3,211
T14	3,368	2,947	3,579	3,053	3,316	3,421	3,632	2,842	3,263	3,211	2,632	3,421	3,211
T15	3,421	2,895	3,632	2,895	3,211	3,421	3,632	2,684	3,158	3,263	2,579	3,316	3,158
T16	3,789	3,526	3,842	3,474	3,526	3,368	3,737	3,053	3,526	3,632	3,000	3,579	3,421
T17	3,789	3,526	3,526	3,842	3,737	3,421	3,737	3,158	3,474	3,632	3,000	3,421	3,368
T18	3,579	3,316	3,632	3,632	3,737	3,579	3,842	3,105	3,263	3,368	3,211	3,421	3,421
T19	3,263	2,947	3,316	3,105	3,263	3,263	3,421	2,842	3,158	3,211	3,000	3,263	3,158
T20	3,895	3,421	3,842	3,895	3,737	3,684	3,789	3,316	3,632	3,789	3,263	3,684	3,421
T21	3,842	3,368	3,842	3,842	3,632	3,737	3,842	3,263	3,526	3,474	3,316	3,684	3,474
T22	3,474	3,368	3,421	3,579	3,368	3,684	3,684	3,263	3,316	3,474	3,053	3,632	3,368
T23	3,684	3,368	3,579	3,947	3,474	3,526	3,684	3,526	3,737	3,632	3,263	3,474	3,684
T24	3,737	3,421	3,579	4,000	3,421	3,316	3,632	3,421	3,684	3,421	3,263	3,316	3,526
T25	3,632	3,316	3,421	3,579	3,158	3,263	3,211	3,105	3,368	3,421	3,158	3,316	3,474
T26	3,158	2,947	3,263	3,263	3,421	3,263	3,316	3,105	3,211	3,263	3,211	3,158	3,526
T27	3,105	3,053	3,579	3,211	3,211	3,263	3,316	2,842	3,211	3,158	3,053	3,053	3,158
T28	3,211	3,105	3,158	3,105	2,947	3,105	3,158	2,895	3,105	3,105	2,737	3,000	3,105

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
T29	3,053	2,947	2,947	3,211	3,105	2,842	3,053	2,684	2,895	3,000	2,474	2,737	2,789
T30	3,421	3,316	3,263	3,421	3,053	3,053	3,211	2,947	3,368	3,158	2,895	3,105	3,158
T31	3,526	3,421	3,368	3,526	3,211	3,053	3,421	3,211	3,421	3,316	3,105	3,158	3,211
T32	3,105	2,947	3,000	2,895	2,947	3,263	3,105	2,947	3,053	2,842	2,684	3,000	3,053
T33	3,737	3,421	3,632	3,737	3,316	3,421	3,737	3,421	3,632	3,579	3,368	3,474	3,632
T34	3,579	3,316	3,316	3,316	3,211	3,263	3,474	3,158	3,526	3,474	3,211	3,263	3,421
T35	3,053	2,947	3,000	3,000	2,895	3,368	3,158	2,789	3,316	2,895	2,842	2,947	3,158
T36	3,737	3,316	3,316	3,684	3,316	3,421	3,526	3,105	3,316	3,316	3,316	3,316	3,368
T37	3,000	2,895	3,000	3,316	3,105	3,105	3,158	2,789	2,947	2,789	2,895	3,105	3,368
T38	3,105	2,789	3,105	3,000	2,947	3,105	3,263	2,632	2,947	2,684	2,684	3,105	3,421
T39	3,316	3,158	3,474	3,158	2,947	3,263	3,474	2,684	3,211	3,211	3,000	3,316	3,579
T40	3,158	3,105	3,579	3,000	2,947	3,368	3,474	2,737	2,895	2,842	2,895	3,158	3,421
T41	2,842	2,737	3,000	2,895	2,895	3,263	3,263	2,684	3,000	2,789	2,737	3,000	3,105
T42	3,368	3,316	3,421	3,474	3,105	3,368	3,526	2,895	3,211	3,211	2,947	3,105	3,526
T43	3,316	3,105	3,526	3,316	2,947	3,421	3,211	2,842	3,053	3,211	3,000	3,263	3,579
T44	3,211	3,105	3,684	3,263	3,000	3,474	3,368	2,895	3,316	3,263	3,105	3,158	3,368
T45	3,579	3,316	3,684	3,684	3,000	3,421	3,474	3,000	3,526	3,316	3,211	3,263	3,684
T46	3,158	2,895	3,263	3,053	2,789	3,105	3,316	2,947	3,263	2,947	2,579	3,211	3,316
T47	2,684	2,579	3,211	2,684	2,579	3,053	3,158	2,789	3,053	2,789	2,368	3,158	3,211
T48	2,842	2,789	3,263	2,895	2,526	3,105	3,263	2,895	3,158	2,842	2,368	3,263	3,211
T49	3,158	2,895	3,579	3,158	2,684	3,211	3,263	2,789	3,053	2,789	2,263	3,158	3,316
T50	3,000	2,737	3,421	2,842	2,579	3,211	3,105	2,474	3,000	2,842	2,158	3,000	3,368
T51	3,000	2,895	3,263	2,947	2,684	3,211	3,263	2,632	3,158	2,895	2,316	3,211	3,474
T52	2,526	2,263	2,947	2,368	2,421	3,000	2,842	2,158	2,579	2,263	1,947	2,789	2,947
T53	3,158	2,842	3,474	2,947	2,842	3,211	3,263	2,789	3,000	3,053	2,474	3,158	3,316
T54	2,842	2,421	3,158	2,316	2,632	3,158	3,158	2,474	2,842	2,737	2,053	2,789	2,947
T55	2,579	2,211	3,053	2,158	2,421	3,053	2,789	2,053	2,579	2,263	2,000	2,579	2,842
T56	2,368	2,105	2,789	2,158	2,211	2,789	2,789	2,158	2,684	2,211	1,947	2,526	2,789
T57	3,368	2,947	3,263	3,000	2,789	3,211	3,211	2,632	3,158	3,158	2,421	2,947	3,526

Załącznik 3. Wartości kryteriów wykonalności (odwrócone, dane ważone)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T1	3,087	2,891	2,565	2,935	2,913	3,109	2,978	2,913
T2	3,348	3,261	2,870	3,152	3,065	3,435	3,457	3,130
T3	3,109	2,717	2,435	3,022	3,065	3,130	2,717	2,357
T4	3,043	2,609	2,652	3,022	2,957	3,087	2,696	2,667
T5	2,589	2,714	2,768	3,000	3,071	3,357	3,089	2,768
T6	2,839	2,929	3,000	3,250	3,304	3,464	3,321	3,214
T7	2,732	2,804	3,036	3,125	3,196	3,393	3,250	3,036
T8	2,821	2,679	2,554	2,857	2,964	3,196	2,964	2,661
T9	2,714	2,929	3,036	3,018	3,107	3,375	3,321	3,393
T10	2,821	2,768	2,911	3,250	3,214	3,429	3,268	3,214
T11	2,696	2,661	2,571	3,161	3,179	3,339	3,071	2,679
T12	2,750	2,804	2,589	3,304	3,268	3,357	2,964	2,696
T13	2,696	2,643	2,870	3,214	3,179	3,339	3,089	2,946
T14	2,661	2,786	2,804	2,982	2,875	3,232	3,268	3,036
T15	2,804	3,000	3,196	3,232	3,161	3,411	3,357	3,232
T16	2,464	2,393	2,411	2,679	2,589	2,911	2,875	2,679
T17	2,464	2,357	2,429	2,750	2,696	2,625	2,464	2,250
T18	2,804	2,821	2,625	2,857	2,750	2,875	2,732	2,893
T19	2,607	2,750	2,804	3,036	3,018	3,125	3,000	2,696
T20	2,518	2,214	2,107	2,661	2,625	2,679	2,607	2,214
T21	2,589	2,321	2,161	2,607	2,625	2,625	2,554	2,107
T22	2,929	2,661	2,500	2,964	2,964	3,000	3,107	2,661
T23	2,673	2,490	2,449	2,571	2,694	2,980	2,592	2,184
T24	2,633	2,469	2,204	2,633	2,571	2,857	2,612	2,265
T25	2,694	2,571	2,429	2,776	2,653	2,837	2,592	2,245
T26	2,981	3,077	2,673	2,808	2,788	3,000	2,865	2,635
T27	2,635	2,769	2,500	2,712	2,615	2,788	2,846	2,481
T28	2,885	2,885	2,827	3,077	3,058	3,058	3,096	2,788
T29	3,096	3,096	2,962	3,154	3,115	3,308	3,231	2,731
T30	2,788	2,769	2,769	3,192	3,077	3,192	2,788	2,615
T31	2,558	2,481	2,423	2,788	2,731	2,788	2,577	2,288
T32	2,820	2,960	2,740	3,140	3,220	3,260	3,160	2,900

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
T33	2,700	2,580	2,640	3,200	2,980	3,100	2,720	2,540
T34	2,820	2,940	2,880	3,300	2,840	2,980	2,980	2,940
T35	2,840	3,020	3,180	3,400	3,300	3,420	3,120	2,800
T36	2,820	2,880	2,820	3,160	3,020	3,180	2,880	2,640
T37	2,909	2,891	2,618	2,709	2,691	2,782	3,036	2,564
T38	2,891	2,909	2,764	2,782	2,782	2,945	3,036	2,600
T39	2,855	2,839	3,339	3,581	3,371	3,677	3,281	2,919
T40	2,629	2,968	3,161	3,484	3,306	3,435	3,258	2,919
T41	3,194	3,403	3,452	3,710	3,581	3,694	3,403	3,113
T42	2,726	2,806	2,742	3,194	3,065	3,242	2,839	2,468
T43	2,694	2,919	3,048	3,484	3,355	3,532	3,226	2,871
T44	2,710	2,726	2,855	3,226	3,145	3,419	3,323	2,790
T45	2,758	2,774	2,677	3,097	2,968	3,145	2,952	2,508
T46	2,919	3,032	3,290	3,435	3,323	3,597	3,177	3,000
T47	2,903	2,919	3,226	3,581	3,516	3,694	3,290	3,145
T48	2,903	2,968	3,194	3,532	3,387	3,645	3,323	3,226
T49	2,911	3,196	2,857	3,250	3,018	3,036	3,232	2,982
T50	2,929	3,196	3,018	3,286	3,250	3,286	3,286	3,161
T51	2,750	2,929	2,946	3,232	3,143	3,161	3,054	3,071
T52	3,268	3,429	3,518	3,554	3,464	3,714	3,732	3,500
T53	3,107	3,018	2,964	3,375	3,125	3,375	3,232	2,946
T54	3,196	3,214	3,393	3,321	3,196	3,393	3,589	3,411
T55	3,536	3,571	3,536	3,500	3,393	3,571	3,750	3,304
T56	3,232	3,446	3,357	3,500	3,268	3,500	3,411	3,250
T57	2,946	3,036	2,750	3,125	3,018	3,214	2,982	2,750

Załącznik 4. Wartości kryteriów atrakcyjności (dane ważone)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
T1	3,413	3,174	3,239	3,326	3,391	3,304	3,565	3,196	3,283	3,239	3,348	3,109	3,565
T2	3,000	2,739	3,283	2,848	3,130	3,152	3,152	2,826	3,109	3,109	2,978	2,935	3,152
T3	3,217	3,000	3,283	3,609	3,565	3,022	3,457	2,978	3,522	3,304	3,609	3,283	3,500
T4	3,587	3,370	3,609	3,739	3,696	3,391	3,783	3,348	3,783	3,609	4,000	3,348	3,565
T5	3,393	3,036	3,857	3,071	3,054	3,357	3,625	2,839	3,589	3,500	2,714	3,446	3,679
T6	3,268	2,732	3,518	3,018	3,071	3,446	3,500	2,679	3,339	3,214	2,625	3,304	3,268
T7	3,232	2,804	3,446	3,018	3,054	3,464	3,571	2,768	3,321	3,250	2,643	3,321	3,339
T8	3,625	3,321	3,482	3,750	3,482	3,643	3,946	3,232	3,911	3,893	3,179	3,696	3,786
T9	3,429	2,893	3,393	2,661	3,071	3,732	3,571	2,982	3,571	3,321	2,804	3,518	3,554
T10	3,214	2,839	3,321	2,839	3,232	3,464	3,393	2,839	3,286	3,125	2,554	3,286	3,321
T11	3,286	2,875	3,464	2,946	3,143	3,518	3,411	3,054	3,232	3,232	2,696	3,464	3,107
T12	3,625	3,036	3,679	2,982	3,232	3,464	3,536	3,018	3,518	3,304	2,768	3,464	3,179
T13	3,446	2,964	3,607	2,768	3,232	3,607	3,500	2,857	3,357	3,411	2,714	3,339	3,411
T14	3,571	3,107	3,750	3,214	3,393	3,464	3,714	2,964	3,429	3,232	2,714	3,518	3,411
T15	3,589	3,036	3,804	2,964	3,250	3,518	3,732	2,750	3,286	3,286	2,661	3,393	3,286
T16	3,893	3,536	4,036	3,571	3,589	3,500	3,875	3,143	3,679	3,732	3,071	3,643	3,554
T17	3,857	3,554	3,661	3,929	3,839	3,571	3,804	3,179	3,607	3,696	3,071	3,518	3,554
T18	3,661	3,339	3,786	3,643	3,839	3,768	3,946	3,143	3,321	3,375	3,250	3,571	3,589
T19	3,321	2,964	3,446	3,125	3,375	3,339	3,554	2,893	3,250	3,268	3,071	3,339	3,232
T20	3,964	3,446	3,911	3,946	3,786	3,804	3,821	3,393	3,768	3,839	3,214	3,714	3,571
T21	3,929	3,339	3,911	3,929	3,750	3,857	3,857	3,304	3,607	3,518	3,321	3,714	3,625
T22	3,446	3,214	3,482	3,464	3,393	3,679	3,643	3,232	3,375	3,500	3,018	3,643	3,446
T23	3,653	3,306	3,633	4,020	3,490	3,612	3,735	3,551	3,776	3,633	3,367	3,408	3,776
T24	3,755	3,286	3,653	4,000	3,449	3,388	3,633	3,449	3,755	3,449	3,388	3,265	3,633
T25	3,755	3,224	3,531	3,673	3,347	3,408	3,347	3,204	3,531	3,408	3,367	3,286	3,653
T26	3,231	2,962	3,365	3,423	3,462	3,288	3,385	3,250	3,288	3,288	3,288	3,212	3,692
T27	3,173	3,058	3,692	3,288	3,269	3,288	3,385	2,923	3,308	3,192	3,212	3,000	3,308
T28	3,173	3,038	3,212	3,154	2,942	3,115	3,231	3,000	3,288	3,269	2,846	3,019	3,288
T29	3,115	2,885	3,000	3,212	3,154	2,923	3,077	2,712	2,942	3,058	2,577	2,712	2,981

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
T30	3,365	3,135	3,250	3,404	3,096	3,038	3,250	3,000	3,404	3,231	2,981	2,981	3,231
T31	3,577	3,404	3,500	3,692	3,327	3,096	3,538	3,346	3,538	3,442	3,231	3,173	3,385
T32	3,220	3,080	3,080	3,000	3,060	3,380	3,180	3,060	3,200	2,940	2,840	3,160	3,160
T33	3,760	3,500	3,660	3,780	3,380	3,460	3,760	3,500	3,720	3,620	3,420	3,580	3,720
T34	3,560	3,300	3,280	3,280	3,220	3,260	3,440	3,180	3,560	3,460	3,200	3,320	3,460
T35	3,100	2,960	2,980	3,000	2,920	3,380	3,120	2,820	3,400	2,860	2,840	3,000	3,180
T36	3,700	3,360	3,300	3,680	3,360	3,400	3,500	3,160	3,380	3,340	3,340	3,400	3,440
T37	3,000	2,836	3,036	3,364	3,200	3,073	3,145	2,855	3,000	2,800	2,945	3,018	3,436
T38	3,145	2,782	3,127	3,218	3,000	3,145	3,327	2,709	3,091	2,782	2,800	3,109	3,545
T39	3,258	3,177	3,468	3,161	2,903	3,274	3,484	2,645	3,226	3,210	3,016	3,355	3,661
T40	3,145	3,145	3,597	3,000	2,903	3,419	3,500	2,710	2,839	2,774	2,871	3,210	3,435
T41	2,726	2,726	2,968	2,855	2,887	3,290	3,258	2,661	2,952	2,758	2,661	3,048	3,065
T42	3,452	3,339	3,452	3,500	3,097	3,387	3,597	2,871	3,210	3,210	2,935	3,145	3,565
T43	3,387	3,113	3,597	3,371	2,919	3,435	3,194	2,806	3,016	3,226	3,016	3,339	3,581
T44	3,226	3,113	3,710	3,274	2,952	3,452	3,323	2,839	3,290	3,274	3,129	3,177	3,403
T45	3,581	3,355	3,758	3,710	2,984	3,435	3,484	2,968	3,548	3,339	3,258	3,371	3,742
T46	3,177	2,952	3,323	3,129	2,661	3,097	3,274	2,952	3,306	2,984	2,419	3,290	3,355
T47	2,677	2,597	3,274	2,710	2,516	3,000	3,097	2,758	3,113	2,806	2,242	3,161	3,226
T48	2,871	2,823	3,355	2,952	2,500	3,113	3,290	2,903	3,226	2,903	2,306	3,355	3,290
T49	3,250	2,929	3,786	3,429	2,857	3,393	3,482	3,000	3,161	2,929	2,393	3,125	3,536
T50	3,161	2,893	3,679	3,143	2,821	3,446	3,375	2,661	3,125	3,036	2,321	3,000	3,554
T51	3,161	2,964	3,464	3,161	2,839	3,375	3,518	2,857	3,321	3,143	2,464	3,232	3,679
T52	2,661	2,268	3,196	2,500	2,571	3,125	3,018	2,286	2,625	2,357	2,054	2,804	3,054
T53	3,286	2,911	3,679	3,089	3,054	3,375	3,446	2,911	3,125	3,232	2,625	3,179	3,464
T54	3,000	2,500	3,357	2,536	2,821	3,286	3,357	2,589	2,982	2,946	2,161	2,786	3,107
T55	2,750	2,268	3,250	2,357	2,607	3,250	2,982	2,125	2,679	2,393	2,107	2,589	3,018
T56	2,536	2,125	3,089	2,357	2,339	3,036	3,036	2,268	2,875	2,375	2,071	2,536	3,036
T57	3,464	2,982	3,429	3,196	2,982	3,375	3,429	2,804	3,321	3,393	2,482	2,946	3,714

