



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII
ZARZĄDZANIA



ROZPRAWA DOKTORSKA

*Model gotowości przedsiębiorstwa
do wdrożenia bliźniaka cyfrowego*

Autor:

mgr Adam OLSZEWSKI

Promotor:

dr hab. inż. Paweł PAWLEWSKI, prof. PP

Promotor pomocniczy:

dr inż. Karolina WERNER-LEWANDOWSKA

Poznań, 2023

*Dziękuję promotorowi dysertacji
Panu dr hab. inż. Pawłowi Pawlewskiemu prof. PP
oraz promotor pomocniczej
Pani dr inż. Karolinie Werner-Lewandowskiej
za ogrom inspiracji i informacji zwrotnych
oraz za wytrwałość w odkrywaniu przede mną
niuansów metod, technik i narzędzi badawczych.*

*Dziękuję żonie Dorocie oraz synom Borysowi i Aleksandrowi
za niepowstrzymaną falę energii, wiary i motywacji
oraz za milion drobnych oznak zrozumienia i wsparcia.*

*Dziękuję Rodzicom, Lidii i Marianowi
za bezwarunkowe poparcie i wspieranie mnie w rozwoju.*

„Różnica między wydajnością a skutecznością – ta sama, która różnicuje mądrość od zrozumienia, wiedzy, informacji i danych — znajduje odzwierciedlenie w różnicy między rozwojem i wzrostem. Wzrost nie wymaga zwiększenia wartości, rozwój owszem. Dlatego rozwój wymaga poszerzania mądrości oraz zrozumienia, wiedzy i informacji”

Russel Ackoff, 1989

Streszczenie

Model gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Ubogi zasób opisanych w literaturze i dostępnych w praktyce biznesowej narzędzi zarządzania wdrożeniem technologii Przemysłu 4.0, takich jak cyfrowy bliźniak, wymaga pilnego uzupełnienia w kontekście dynamicznie rosnącej aktywności przedsiębiorstw w zakresie transformacji cyfrowej. Przedstawione w rozprawie badanie istniejących wzorców, standardów i modeli gotowości przedsiębiorstw do wdrażania bliźniaka cyfrowego w odniesieniu do aktualnych, dynamicznie zmieniających się, uwarunkowań rynkowych zaowocowało przedstawieniem propozycji wielowymiarowego i uniwersalnego modelu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego.

Posługując się metodami analizy i krytyki piśmiennictwa, synektyki Gordona, studium przypadku oraz wiedzą ekspercką, autor dysertacji zgromadził i uporządkował wyniki dotychczasowych badań, zaprojektował model gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego, a następnie przeprowadził jego walidację przy udziale przedsiębiorstw w sektorach usług, handlu oraz produkcji. W wyniku badania stanu wiedzy w zakresie gotowości danych, dojrzałości zarządzania danymi oraz technologii, opracowano podstawy teoretyczne modelu. Wykraczająca poza nauki o zarządzaniu i jakości analiza rodzajów bliźniaków cyfrowych, wykorzystywanych przez nie metod i obszarów zastosowań (w przemyśle, medycynie, geologii, logistyce), poszerzyła zasięg dziedzinowy i semantyczny zidentyfikowanych w fazie koncepcyjnej problemów naukowych. Synteza pojęć i komponentów istniejących modeli gotowości oraz dojrzałości wzbogaciła twórczą część fazy projektowej i doprowadziła do realizacji celów pośrednich w postaci propozycji wymiarów i parametrów gotowości. Wypracowany model został zbudowany z czterech części, które obejmują następujące narzędzia:

- a) część epistemologiczna - formularz skwantyfikowanego opisu planowanego wdrożenia,
- b) część formalna - wzory służące obliczeniu parametrów,
- c) część graficzna – wizualizacja wektorów zmian stanów gotowości w przestrzeni euklidesowej,
- d) część decyzyjna – diagram procesu podejmowania decyzji o wdrożeniu.

W celu podniesienia użyteczności zastosowania wyników badań w zakresie wspierania decyzji, zaproponowano wzory na obliczenie adekwatności, efektywności oraz ryzyka planowanego wdrożenia. W wyniku walidacji zaprojektowanego modelu w rzeczywistości

biznesowej uzupełniono część epistemologiczną modelu i wykonano redukcję zduplikowanych oraz nieadekwatnych obiektów.

Wypracowana w toku badania propozycja modelu wnosi do dyscypliny nauk o zarządzaniu i jakości wkład w postaci uporządkowanych wymiarów i parametrów oceny stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego, jak również wspiera przedsiębiorstwo w decyzji o wyborze scenariusza wdrożenia bliźniaka cyfrowego, co wypełnia zidentyfikowaną w fazie koncepcyjnej badań lukę badawczą, jak i postawione cele.

Abstract

Enterprise readiness model for digital twin

The poor selection of tools for managing the introduction of Industry 4.0 technologies, such as the digital twin, described in literature and available in business practice, needs to be urgently addressed in the context of companies' dynamically growing digital transformation activity. The study of the existing patterns, standards and models of enterprise readiness for digital twins, presented in the dissertation in the context of the current, dynamically changing market conditions, resulted in the proposed multidimensional and universal model of enterprise readiness for digital twin.

By means of literature analysis and critique, Gordon's synectics, case studies and expert knowledge, the author of this dissertation collected and organized the results of previous research, designed a model of enterprise readiness for digital twin, and validated it against enterprises coming from services, trade and manufacturing sectors . Following a state of knowledge study in the fields of data readiness, technology, data management maturity the theoretical basis for the model was developed. By reaching beyond the field of management and quality, the analysis of digital twin types, methods used and application areas (in industry, medicine, geology, logistics) has extended the domain and semantic range of scientific problems identified in the conceptual phase of this study. The synthesis of concepts and components of the existing readiness and maturity models enriched the creative part of the design phase of this study and enabled the author to achieve intermediate goals in the form of proposed readiness dimensions and parameters. The developed model consists of four parts, including the following tools:

- e) epistemological part - a quantified description form of the planned implementation,
- f) formal part - formulas for calculating parameters,
- g) graphic part - visualization of readiness state change vectors in Euclidean space,
- h) decision-making part - diagram of the implementation decision-making process.

In order to increase the usability of this research results for decision support, the author proposed formulas for calculating the adequacy, effectiveness and risk of the planned implementation. By validating the designed model in the business reality, the epistemological part of the model was enriched and the duplicate and inadequate objects were reduced.

The model, developed in the course of this study, contributes to the discipline of management and quality sciences by proposing structured dimensions, parameters for assessing

a company's readiness for digital twins. It also supports the company in the decision-making concerning the selection of digital twin implementation scenarios. Consequently, the proposed results fulfill the research gap and goals identified in the conceptual phase of this study.

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ, SYMBOLI I SKRÓTÓW	11
SŁOWNIK POJĘĆ	13
1. PRZESŁANKI PODJĘCIA TEMATU DYSERTACJI.....	16
1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu badań	16
1.2 Przedmiot badań.....	21
1.3 Cel badawczy dysertacji.....	22
1.4 Problem badawczy.....	23
1.5 Pytania badawcze	24
1.6 Metoda realizacji celu dysertacji.....	24
1.7 Struktura dysertacji	28
2. BADANIE LITERATURY	31
2.1 Procedura badania literatury	31
2.2 Etap 1 – Planowanie	32
2.3 Etap 2 – Wyszukiwanie	35
2.4 Etap 3 - Analiza.....	40
2.5 Etap 4 - Wnioskowanie.....	41
3. DOJRZAŁOŚĆ ZARZĄDZANIA DANymi NA POTRZEBY WDROŻENIA BLIŻNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE LITERATUROWE.....	42
3.1 Pojęcie gotowości w naukach o zarządzaniu	42
3.2 Pojęcie dojrzałości w naukach o zarządzaniu i jakości.....	43
3.2.1 Przesłanki do budowania modeli dojrzałości	43
3.2.2 Definicje modeli dojrzałości	46
3.2.3 Poziomy dojrzałości i gotowości – problematyka ich definiowania.....	49
3.2.4 Kryteria klasyfikacji poziomów dojrzałości.....	50
3.2.5 Działania podnoszące poziom dojrzałości przedsiębiorstwa.....	53
3.2.6 Poziom adekwatności.....	54
3.2.7 Definicja modelu gotowości dla potrzeb dysertacji	55

3.3	Koncepcja gotowości do dojrzałości	55
3.4	Przesłanki do budowy autorskiego modelu gotowości	58
3.4.1	Zarządzanie danymi – jako przesłanka do budowy modelu oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego	58
3.4.2	Metody zarządzania danymi	59
3.4.3	Dojrzałość zarządzania danymi w oparciu o model semantyczny	61
4.	ŚRODOWISKO FUNKCJONOWANIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE LITERATUROWE.....	65
4.1	Objaśnienie podstawowych pojęć związanych z bliźniakiem cyfrowym.....	65
4.1.1	Przesłanki i potrzeba definicji cyfrowego bliźniaka	65
4.1.2	Pojęcia: cyfrowy bliźniak, cyfrowa nić, cyfrowy cień, model cyfrowy	66
4.1.3	Definicja pojęcia cyfrowy bliźniak przyjęta w dysertacji	70
4.1.4	Budowa bliźniaka cyfrowego - podejście obiektowe i procesowe	71
4.1.5	Obszary zastosowań bliźniaków cyfrowych.....	76
4.2	Opracowanie podstaw teoretycznych dla wymagań bliźniaków cyfrowych w zakresie danych.....	80
4.2.1	Transformacja: dane - informacje – wiedza	80
4.2.2	Przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym	83
4.2.3	Abstrakt graficzny transmisji i transformacji danych.....	83
4.2.4	Interesariusze danych – definicja relacji w kontekście bliźniaka cyfrowego	85
4.2.5	Definicja danych i zarządzania danymi dla potrzeb dysertacji	86
4.2.6	Zarządzanie danymi – przykładowe studia przypadku	87
4.3	Opracowanie podstaw teoretycznych w zakresie atrybutów danych i ich gotowości do wykorzystania przez bliźniaka cyfrowego.....	94
4.3.1	Definicja atrybutu	94
4.3.2	Wpływ atrybutów danych na jakość działania bliźniaka cyfrowego	95
4.3.3	Zbiory atrybutów – atrybuty uniwersalne, atrybuty specyficzne.....	98
4.3.4	Wpływ atrybutów na wiarygodność bliźniaka cyfrowego.....	100

4.3.5	Pomiar atrybutów i ich analiza.....	102
5.	MODEL GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE TEORETYCZNE.....	104
5.1	Model epistemologiczny	104
5.2	Model graficzny	104
5.2.1	Diagram procesu podejmowania decyzji w modelu zarządzania gotowością	105
5.2.2	Przestrzeń zmiany stanów gotowości w modelu graficznym RM4DT	106
5.3	Model formalny.....	109
5.4	Model decyzyjny	115
6.	MODEL GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BC – UJĘCIE PRAKTYCZNE	118
6.1	Praktyczne zastosowanie modelu RM4DT	118
6.1.1	Zastosowanie modelu RM4DT - przykład przedsiębiorstwa usługowego ..	119
6.1.1.1	Charakterystyka obiektu badań.....	119
6.1.1.2	Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego	120
6.1.1.3	Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego	121
6.1.1.4	Wytyczenie wektora zmian	123
6.1.1.5	Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia	124
6.1.1.6	Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego....	125
6.1.2.	Zastosowanie modelu RM4DT - przykład przedsiębiorstwa handlowego	127
6.1.2.1	Charakterystyka obiektu badań.....	127
6.1.2.2	Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego	127
6.1.2.3	Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego	128
6.1.2.4	Wytyczenie wektora zmian	130
6.1.2.5	Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia	131
6.1.2.6	Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego....	133
6.1.3	Zastosowanie modelu RM4DT-przykład przedsiębiorstwa produkcyjnego	134

6.1.3.1	Charakterystyka obiektu badań.....	134
6.1.3.2	Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego	134
6.1.3.3	Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego	135
6.1.3.4	Wytyczenie wektora zmian	138
6.1.3.5	Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia	139
6.1.3.6	Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego	140
6.2	Praktyczne zastosowanie modelu RM4DT – konkluzje z badań	142
7.	WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	145
7.1	Odpowiedzi na pytania badawcze i wnioski.....	145
7.1.1	Wymiary gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego	146
7.1.2	Dojrzałość przedsiębiorstwa do zarządzania danymi w modelu RM4DT ...	146
7.1.3	Parametry wymiarów gotowości przedsiębiorstwa w modelu RM4DT	147
7.1.4	Ocena stanu gotowości przedsiębiorstwa przy użyciu modelu RM4DT	148
7.1.5	Poprawa użyteczności wyników oceny stanu gotowości przedsiębiorstwa	148
7.2	Kierunki dalszych badań	149
SPIS LITERATURY I STRON INTERNETOWYCH		151
SPIS RYSUNKÓW.....		161
SPIS TABEL		163
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW		165
	Załącznik 01. Formularz oceny stanu gotowości do wdrożenia BC.....	166
	Załącznik 02. Formularz eksperckiej oceny gotowości cyfrowej przedsiębiorstwa.....	171

SPIS OZNACZEŃ, SYMBOLI I SKRÓTÓW

3D	trójwymiarowy, z ang.: <i>three dimensional</i>
AGV	pojazd sterowany automatycznie, z ang.: <i>automated guided vehicles</i>
AMR	autonomiczne roboty mobilne, z ang.: <i>autonomous mobile robots</i>
AI	sztuczna inteligencja, z ang.: <i>artificial intelligence</i>
AO	proces optymalizacji spójności, z ang.: <i>alignment optimization</i>
AR	rozszerzona rzeczywistość, z ang.: <i>augmented reality</i>
BC	bliźniak cyfrowy
BIM	modelowanie informacji o budynkach, z ang.: <i>building information modelling</i>
BPM	zarządzanie procesami biznesowymi, z ang.: <i>business process management</i>
BPMM	model dojrzałości procesów biznesowych, z ang.: <i>business process maturity model</i>
CG	cel główny
CMM	model dojrzałości możliwości, z ang.: <i>capabilities maturity model</i>
CMMI	zintegrowany model dojrzałości możliwości, z ang.: <i>capabilities maturity model integrated</i>
CPS	system cyberfizyczny, z ang.: <i>cyber-physical system</i>
cyfr.	cyfrowy
dane	zbiór wartości przetwarzania przy pomocy umysłu lub komputera; dane mogą przyjmować formę znaków, wykresów, tabel, sygnałów, obrazów; są źródłem informacji, o ile mogą zostać zrozumiane przez odbiorcę
dojrz.	dojrzałość
DIK	model teoretyczny transformacji wiedzy w postaci piramidy dane-informacje-wiedza, z ang.: <i>data-information-knowledge</i>
DT	cyfrowy bliźniak, z ang.: <i>digital twin</i>
ERP	planowanie zasobów przedsiębiorstwa, z ang.: <i>enterprise resource planning</i>
FGI	grupowy wywiad fokusowy, z ang.: <i>focus group interview</i>
GIS	system informacji geograficznych, z ang.: <i>geographic information system</i>
GPU	procesor przetwarzania graficznego – jednostka komputera w postaci obwodu elektronicznego, zaprojektowana z myślą o modyfikacji pamięci komputera w celu przyspieszenia tworzenia i przetwarzania danych obrazowych z ang.: <i>graphics processing unit</i>

H2M	interfejs człowiek-maszyna, z ang.: <i>human-to-machine</i>
HEDIIP	Program Poprawy Informacji i Danych o Szkolnictwie Wyższym, z ang.: <i>Higher Education Data and Information Improvement Programme</i>
HESA	Agencja Statystyczna Szkolnictwa Wyższego, z ang.: <i>Higher Education Statistics Agency</i>
HPC	obliczenia o wysokiej wydajności, z ang.: <i>high-performance computing</i>
ICT	technologie informacyjne i komunikacyjne, z ang.: <i>information and communication technologies</i>
IoT	Internet Rzeczy, z ang.: <i>Internet of things</i>
LiDAR	narzędzie i metoda zdalnego pomiaru odległości w drodze skierowania na mierzony obiekt światła, z ang.: <i>light detection and ranging</i>
M2M	interfejs maszyna-maszyna, z ang.: <i>Machine-to-Machine</i>
MŚP	małe i średnie przedsiębiorstwa
RM4DT	model gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego, z ang.: <i>readiness model for digital twin</i>
n/d	nie dotyczy
P3M3	model dojrzałości zarządzania portfolio, programami i projektami, z ang.: <i>Portfolio, Programme and Project Management Maturity Model</i>
PFE	maksymalna oczekiwana ekspozycja w określonym czasie, obliczona z pewnym poziomem niepewności (tj. przy danym kwantylu); z ang.: <i>Potential Future Exposure</i>
PLC	programowalny sterownik logiczny, z ang.: <i>Programmable Logic Controller</i>
PRINCE2	projekty w kontrolowanych środowiskach, z ang.: <i>Projects IN Controlled Environments (PRINCE2)</i>
SPICE	ustandaryzowana poprawa procesów dla przedsiębiorstw budowlanych
UAV	bezzałogowy pojazd latający, z ang.: <i>unmanned aerial vehicle</i>
VPH	inicjatywa środowiska akademickiego wspierająca tworzenie zaawansowanych modeli symulacyjnych autonomicznych układów ludzkiego organizmu, pozwalających na integrację cech mechanicznych, biologicznych, chemicznych i genetycznych, z ang.: <i>virtual physiological human</i>
VR	wirtualna rzeczywistość, z ang.: <i>virtual reality</i>
w zal.	w zależności

SŁOWNIK POJĘĆ

Aspiracje cyfrowe	oczekiwany poziom cyfryzacji
Bliźniak cyfrowy	wirtualna reprezentacja systemu fizycznego, tj. środowiska, procesu, obiektu wraz z jego elementami, cechami i funkcjonalnościami, których poziom wierności odzwierciedlenia umożliwia symulację i ocenę alternatywnych scenariuszy przyszłości bez straty jakościowej symulowanych zdarzeń w porównaniu z rzeczywistymi zdarzeniami w zakresie kluczowych dla decydenta parametrów
Cyfryzacja	proces transformacji danych, informacji i wiedzy do postaci cyfrowej
Cykl życia	etapy istnienia (produktu, systemu, bliźniaka cyfrowego, przedsiębiorstwa) od koncepcji do wycofania z eksploatacji.
Crowdsourcing	z ang. dosł.: gromadzenie od tłumu, pozyskiwanie potrzebnej wiedzy, danych, dóbr, usług od grupy osób, często niepowiązanych zawodowo ani dziedzinowo
Dane cyfrowe	Dane, informacje, wiedza w postaci, umożliwiającej ich przetwarzanie przez komputer
Digital Twin	z ang.: Bliźniak Cyfrowy (BC)
Dojrzałość	ilekroć w dysertacji użyte jest pojęcie dojrzałości, oznacza ono dojrzałość przedsiębiorstwa, rozumianą jako poziom zaawansowania rozwoju technologii, kultury organizacyjnej oraz zarządzania procesami i zasobami w przedsiębiorstwie oraz jego otoczeniu
Dojrzałość danych	poziom gotowości danych w przedsiębiorstwie do wykorzystania ich przez systemy komputerowe
Dojrz. zarządzania danymi	wydajność przedsiębiorstwa w zakresie generowania wartości dodanej w oparciu o dane
Efektywność	stosunek uzyskanej dzięki wdrożeniu BC wartości dodanej do poziomu nakładów, potrzebnych do przeprowadzenia wdrożenia

Farma renderująca	zespół połączonych komputerów, wyposażonych w procesory graficzne o wysokiej wydajności i parametrach dedykowanych przetwarzaniu dużych ilości danych obrazowych
Geomodelowanie	tworzenie wirtualnej reprezentacji lub liczbowego odpowiednika fragmentów skorupy ziemskiej na i pod jej powierzchnią
Gotowość	stan przedsiębiorstwa, w którym wartości parametrów gotowości technologii, danych i dojrzałości zarządzania danymi są na poziomie wystarczającym do podjęcia określonych działań
Gotowość cyfrowa	stan przedsiębiorstwa, określony przez jego ogólną zdolność transformacji przy użyciu technologii cyfrowych
Kobotyzacja	wprowadzenie do procesu produkcyjnego robotów towarzyszących operatorowi ludzkiemu na stanowisku roboczym, w celu wykonywania operacji procesu z ograniczonym udziałem człowieka
Masowa kastomizacja	proces różnicowania krótkich serii produktu masowego zgodnie z oczekiwaniami grup klientów
Model graficzny	graficzne przedstawienie sekwencji działań, jakie należy wykonać, aby zastosować model dojrzałości oraz wektorów zmian związanych z planowaną transformacją cyfrową
Model formalny	liczbowo-literowe przedstawienie symboli, wzorów oraz wartości przypisywanych poszczególnym poziomom, kryteriom i parametrom dojrzałości cyfrowej
Model decyzyjny	sekwencja etapów i czynności, jakie należy wykonać, aby zastosować model dojrzałości w przedsiębiorstwie
Model gotowości	uniwersalna konstrukcja stanów, wymiarów i parametrów gotowości wraz z ich opisami, wzorami i sekwencjami zalecanych czynności, jakie dowolne przedsiębiorstwo może zastosować w celu optymalizacji nakładów planowanych do poniesienia w związku z wdrożeniem bliźniaka cyfrowego.
Model ontologiczny BC	zestaw specyficznych obiektów semantycznych wraz z relacjami między tymi obiektami, służący do projektowania, budowania i analizowania wirtualnej konstrukcji cyfrowego bliźniaka

Optymalizacja	organizowanie działań i/lub procesów w taki sposób, aby dały jak największe efekty przy jak najmniejszych nakładach czasu, środków, zasobów
Partner transformacji	organizacja uczestnicząca w transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa
Personalizacja	proces dostosowywania produkcji do oczekiwań i potrzeb klienta na poziomie pojedynczego produktu
Stan gotowości	stan gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC, mierzony w zakresie trzech wymiarów gotowości. W dysertacji wyróżniono trzy stany gotowości: stan Zero – brak gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC; stan Alfa – gotowość przedsiębiorstwa do rozpoczęcia wdrożenia BC; stan Beta – gotowość przedsiębiorstwa do doskonalenia w oparciu o BC
Przestrzeń zmian gotowości	graficzne przedstawienie wektora zmiany stanu gotowości jako wypadkowej wektorów zmian poszczególnych jej wymiarów: gotowości danych w przedsiębiorstwie, dojrzałości procesów zarządzania danymi przez przedsiębiorstwo oraz gotowości technologii
Transformacja cyfrowa	proces zmiany poziomu dojrzałości cyfrowej
Walidacja	potwierdzenie poprzez dostarczenie obiektywnego dowodu spełnienia określonych założeń, bądź wymagań odnośnie konkretnego scenariusza zastosowania
Wektor zmiany	obiekt graficzny w przestrzeni zmian gotowości w postaci modułu z grottem, obrazujący wielkość, kierunek i zwrot zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC lub zmian w jednym z wymiarów gotowości, planowanych przez przedsiębiorstwo w związku z wdrożeniem BC
Wymiar gotowości	jeden z zakresów oceny stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC

1. PRZESŁANKI PODJĘCIA TEMATU DYSERTACJI

1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu badań

W ostatnich latach zdolność przedsiębiorstw do transformacji cyfrowej stała się kluczowym czynnikiem ich konkurencyjności (Golińska-Dawson i in., 2023). Na wszystkich poziomach zarządzania danymi, od systemów wbudowanych i PLC indywidualnych maszyn, poprzez operacje odcinków linii produkcyjnej, aż po ERP i podejmowanie decyzji na poziomie menedżerskim, przedsiębiorstwa stoją przed koniecznością optymalizacji metod gromadzenia, przetwarzania i analizowania informacji oraz danych. Powstające w tym procesie środowiska informatyczne odzwierciedlają wybrane fragmenty procesów i w konsekwencji zapewniają grunt do tworzenia tzw. bliźniaka cyfrowego (BC) (z ang.: *Digital Twin - DT*) przedsiębiorstw (Freiberger i in., 2017, s. 113).

Wzrostowi dostępnych na rynku bliźniaków cyfrowych towarzyszy rozwój metod i standardów zarządzania danymi, z których nieliczne zostały naukowo przeanalizowane i poddane walidacji (Neagu i in., 2011, 7-14; Barbosa i in., 2020, s. 3). Ubogi w modelowe wzorce i standardy zarządzania dużymi zbiorami danych rynek doświadcza turbulencji zarówno na etapie planowania transformacji, które prowadzone jest niedbale, zbyt późno i szczątkowo, jak i wdrażania, prowadzonego w sposób chaotyczny (Abraham, Schneider i Brocke, 2019, s. 434). Pozorna łatwość przeprowadzenia w przedsiębiorstwie transformacji cyfrowej, polegającej na zakupieniu i wdrożeniu narzędzia cyfrowego w znacznej części prowadzi do duplikowania zadań, pomijania istotnych danych, wykrzywiania i wydłużania procesów i procedur, niezrozumienia celów przez zespoły wdrażające i w rezultacie do zwiększenia kosztów operacyjnych (Longo i in., 2023).

Ryzykownym krokiem i częstą przyczyną niezadowolających wyników wdrożeń cyfrowych bliźniaków w przedsiębiorstwach jest definiowanie celów i wskaźników transformacji. Podczas gdy faktyczne cele są biznesowe, przedsiębiorstwa często ograniczają się do definiowania jedynie technologicznych wskaźników wdrożeń, myląc cel ze sposobem dotarcia do niego. Tymczasem, wielu menedżerów skupia się na technologicznych aspektach wdrożenia tak bardzo, że zamiast wskaźników biznesowych, ograniczają się do pomiaru wskaźników wydajności technologicznej, takich jak liczba użytkowników na licencję, czy liczba procesów obsługiwanych przez nowe narzędzie. Skuteczna transformacja wymaga postawienia celów biznesowych i oparcia ich na danych, których pozyskanie i przetwarzanie

jest dla przedsiębiorstwa realne. Liderzy transformacji cyfrowej wytyczają kluczowe wskaźniki efektywności, tzw. KPI (z ang.: *Key Performance Indicators*) spójne ze strategicznymi wskaźnikami rozwoju przedsiębiorstwa. Zadaniem tych KPI jest pomiar dojrzałości, rozumianej jako wzrost wartości dodanej w przedsiębiorstwie, a nie rozwój infrastruktury technologicznej (Kwan, Muttreja i Schrage, 2022, s. 35).

Deficyt uniwersalnych modeli i narzędzi do zarządzania danymi zwiększa ryzyko inwestycyjne i spowalnia wdrażanie narzędzi Przemysłu 4.0, takich jak BC. Podczas gdy coraz więcej strategicznych decyzji biznesowych podejmowanych jest w oparciu o analizę danych gromadzonych w różnych bazach i środowiskach lokalnych oraz chmurowych, źle dobrane modele i niskiej jakości dane prowadzą do poważnych komplikacji wdrożeniowych (Mittal i in., 2018). Nieskorelowane, nieaktualne dane, rozproszone po niespójnych systemach i środowiskach, zarządzane wg modeli nieadekwatnych dla danego przedsiębiorstwa, zamiast podnosić konkurencyjność, mogą prowadzić do podejmowania złych decyzji i obniżenia sprawności oraz konkurencyjności przedsiębiorstwa (Nousak, Phelps i Hill, 2001, s. 1).

Już w 2016 r. 64% polskich małych i średnich przedsiębiorstw (tzw. MŚP) potwierdziło, że cyfryzacja byłaby dla nich korzystna, podczas gdy tylko 27% potrafiło wskazać, jak ten proces powinien przebiegać (Olszewski, 2016). Późniejsze raporty McKinsey (McKinsey, 2018), Siemens (Siemens, 2021) oraz Deloitte (Trendy Technologiczne, 2023) wskazują na nieznacny, lecz stały wzrost zainteresowania cyfryzacją wśród MŚP przy jednoczesnym niedostatecznym zasobie własnych kompetencji cyfrowych. Trzy z siedmiu kluczowych czynników umożliwiających dalszą cyfryzację w Polsce dotyczą kompetencji cyfrowych:

- a) ogólna poprawa umiejętności cyfrowych,
- b) zwiększenie liczby specjalistów ICT,
- c) szkolenie pracowników w zakresie kompetencji cyfrowych (McKinsey, 2018).

Niski poziom kompetencji cyfrowych obejmuje wszystkie szczeble zatrudnienia w przedsiębiorstwach, włącznie z menedżerami. Dlatego, w odróżnieniu od klasycznych metod zarządzania przedsiębiorstwem, cyfryzacja, a w szczególności zarządzanie danymi, stanowi wyzwanie dla menedżerów, spośród których niewielu jest zaznajomionych z najnowocześniejszymi narzędziami i trendami w digitalizacji, takimi jak bliźniaki cyfrowe, outsourcing IT, czy organizacja dużych zbiorów danych (Machado i in., 2019; Werner-Lewandowska i in., 2022; Więcek-Janka i in., 2023). Nawet cyfrowo zaawansowany menedżer nie ma możliwości prowadzić transformacji cyfrowej w otoczeniu pracowników pozbawionych podobnych kompetencji. Kompetentny cyfrowo menedżer powinien zapewnić wybór

odpowiedniego dla przedsiębiorstwa modelu dojrzałości, narzędzi cyfryzacji i ich dostawców. Jednak powodzenie transformacji cyfrowej zależeć będzie od całego korpusu pracowników.

Dodatkowe wyzwanie, ściśle związane z modelem gotowości w zakresie zarządzania danymi, stanowi nieumiejętna ocena bieżącej sytuacji przedsiębiorstwa i określenie optymalnego zakresu wdrożenia cyfrowego bliźniaka. Istniejące modele gotowości przedsiębiorstw, opracowane głównie z myślą o dojrzałych cyfrowo gospodarkach amerykańskiej i zachodnioeuropejskich, ignorują charakterystyczne dla słabo rozwiniętych cyfrowo przedsiębiorstw czynniki zarządzania danymi, kluczowe przy wdrażaniu cyfrowych bliźniaków, takie jak ograniczenia kompetencyjne na wszystkich szczeblach organizacji, niespójna i rozproszona wiedza i dane w przedsiębiorstwie, niestabilność ram prawnych oraz dynamicznie zmieniająca się sytuacja finansowa i organizacyjna. W rezultacie, opracowywane przez naukowców narzędzia nie znajdują zastosowania w przemyśle nie tyle z powodu ich niskiej przydatności, co z powodu braku walidacji modeli z uwzględnieniem zarządzania danymi.

Dodatkowe utrudnienie przy ustalaniu planu wdrożenia BC stanowi aspekt niepewności względem wiarygodności danych, w których gromadzeniu i przetwarzaniu uczestniczą ludzie. Optymalizację tejże niepewności potencjalnie mogłyby zapewnić istniejące teorie i metody, takie jak liczby rozmyte, czy metoda systemów szarych. Wraz z powszechnym wzrostem świadomości nt. niedoskonałości danych dostarczanych systemom w celach symulacyjnych, w tym prognostycznych, rozwinięto szereg teorii i metod, adresujących wątki niepewności oraz niedoskonałości danych. W latach 60-tych prof. L. A. Zaden rozpoczął prace w obszarze matematyki rozmytej, liczb przedziałowych i zbiorów rozmytych. W latach 80-tych Profesor Z. Pawlark zainicjował badania nad teorią zbiorów przybliżonych, co ułatwiło identyfikowanie danych redundantnych i eliminowanie tzw. reduktów w tablicach informacyjnych, a Profesor Wang Guang-yuan wniósł szereg nowych pojęć w obszarze matematyki nieustalonej i stanów nieustalonych. Jednak proponowane aktualnie w literaturze modele decyzyjne, wykorzystujące systemy szare, oparte na funkcjach wybielania, pętlach zwrotnych czy rozproszoności, nie adresują specyficznych dla narzędzi transformacji cyfrowej czynników niepewności dotyczących m.in. określenia progów jakościowych dla pochodzących ze stanowisk roboczych danych o skrajnych wartościach, czy sposobu interpretacji luk w szeregach czasowych, generowanych przez hybrydowe stanowiska robocze człowiek-maszyna. Niemniej, w oparciu o w/w teorię, prof. Deng Julong rozpoczął prace nad metodą systemów szarych, której główny cel stanowiło analizowanie problemu z perspektywy niepewności wynikających z małej ilości

i niskiej jakości danych, co stanowi podstawowe wyzwanie w kontekście zarządzania danymi podczas wdrażania BC (Forrest i Liu, 2007, s. 115-116).

Źródło kolejnych niepewności, specyficznych dla przedsiębiorstw, mogą stanowić błędy urządzeń, niewiarygodność operatora ludzkiego dostarczającego dane, czy niedostateczne kompetencje dziedzinowych eksperta, wykonującego analizę danych. Ponadto, personel zakładu może nieprawidłowo oceniać i/lub opisywać dane z powodu niewystarczającego zrozumienia kolejno wdrażanych w ramach cyfryzacji nowych systemów. Co za tym idzie, personel może pomijać lub zniekształcać istotne dla funkcjonowania systemów elementy danych, takie jak bezczynność stanowisk roboczych, krótkotrwałe spowolnienia, czy elementy kodów usterek podawanych w obcym języku, uważając takie informacje i rozróżnienia za mało istotne (Sonmez i in., 2018, s. 121). Wreszcie, ilość danych generowanych przez operatorów w fabryce, kumulacja ich wzajemnie zależnych źródeł oraz możliwych do zastosowania perspektyw, kryteriów ich opisu, oceny i analizy stanowią w fabryce wyzwanie wysoce złożone, utrudniając optymalizację niepewności decyzyjnej menedżera. W kontekście zarządzania przedsiębiorstwem, krytycznym obszarem podejmowania decyzji w oparciu o dane jest strefa decyzji o potencjalnie katastrofalnych skutkach, które muszą zostać podjęte w oparciu o dane, znajdujące się pomiędzy progiem danych skrajnie niewiarygodnych, podlegających zignorowaniu, a progiem danych o niepodważalnej wiarygodności (Barkallah, 2022, s. 7-11). Możliwość obniżenia niepewności w tym właśnie obszarze stanowi kluczową wartość metody, proponowanej w dalszych rozdziałach.

Aby ograniczyć niepewność decyzyjną oraz wzmocnić menedżerów w świadomym i dobrze zorganizowanym przygotowaniu danych przedsiębiorstwa do wdrożenia cyfrowego bliźniaka, w dysertacji poddano analizie i uporządkowano istniejące w literaturze definicje, narzędzia, scenariusze i komponenty bliźniaka cyfrowego, zaproponowano model gotowości przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi na potrzeby wdrażania cyfrowych bliźniaków, a także dokonano identyfikacji spektrum dalszych badań w obszarze modeli decyzyjnych dla przedsiębiorstw.

Propozycja wiarygodnego modelu gotowości w zakresie zarządzania danymi poszerza spektrum możliwości przyjęcia przez przedsiębiorstwo zaawansowanych narzędzi cyfrowych, takich jak cyfrowe bliźniaki.

W związku z powyższym, model gotowości powinien dawać możliwość adaptowania monitorowanych parametrów do celów danego przedsiębiorstwa. Definiowane wskaźniki oceny i zmiany stanu gotowości powinny z jednej strony uwzględniać cele strategiczne przedsiębiorstwa, a z drugiej umożliwiać monitorowanie jakości i efektywności wdrożenia BC

na poziomie technicznym. Co więcej, model decyzyjny powinien uwzględniać perspektywę właściciela danych, która pomaga regulować aspekt otwartych danych i ich udostępniania (Eckartz, Hofman i Van Veenstra, 2014, s. 262). Wypracowany w takim podejściu model decyzyjny pozwalałby osadzać poszczególne grupy danych w kontekście celów rozwoju biznesowego, prowadząc do sprawniejszego opracowywania planów rozwojowych przedsiębiorstwa i do poprawy podejmowanych decyzji.

Skrupulatne zaplanowanie transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa, możliwość korzystania z walidowanych narzędzi i metod oraz świadome zarządzanie tymi procesami są niezbędne do uzyskania oczekiwanej wartości. Pierwszym krokiem jest analiza dotychczasowych udanych i nieudanych wdrożeń oraz zrozumienie, że ocena poziomu gotowości cyfrowej i podnoszenie tego poziomu czy to w skali zespołu, czy też całego przedsiębiorstwa, jest zadaniem złożonym (Batini, Scannapieco, 2016, s. 353).

Mimo że można zaobserwować szybki wzrost skali wykorzystania różnego rodzaju narzędzi cyfrowych przez przedsiębiorstwa, społeczność naukowa nie odpowiada rzeczywistemu zapotrzebowaniu i dynamice rozwoju gospodarki. Chociaż środowisko akademickie od dłuższego czasu zajmuje się zarządzaniem danymi i cyfrowymi bliźniakami, te dwa pojęcia rzadko pojawiają się w publikacjach wspólnie. Co więcej, były one rzadko analizowane w kontekście gotowości przedsiębiorstwa.

W oparciu o powyższe obserwacje i własne doświadczenia zawodowe autora, zidentyfikowano lukę badawczą w obszarze metodyki pozwalającej na neutralizację niepewności związanej z podjęciem przez przedsiębiorstwo decyzji o zakresie i skali wdrożenia BC. Punkt wyjścia do proponowanego w dysertacji modelu gotowości stanowią zaobserwowane niedobory tak w literaturze, jak i w istniejących modelach gotowości przedsiębiorstw, a także brak odniesienia ich do adekwatności zakresu, skali i narzędzi cyfryzacji do oczekiwanych rezultatów. W związku z tym w dysertacji przyjęto założenie, że nastawiony na redukcję, a nie maksymalizację, zakresu i skali zaawansowania danych model gotowości przedsiębiorstwa może w istotnym stopniu poprawić trafność decyzji o wdrożeniu BC. Jednym z niestandardowych działań, przewidzianych w rozprawie jest uzupełnienie modelu gotowości o ocenę dojrzałości przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi, co powinno poprawić jakość oceny stanów gotowości do wdrożenia BC.

1.2 Przedmiot badań

W dysertacji podjęto aktualny problem gotowości organizacji w zakresie danych, technologii oraz zarządzania danymi jako zasobami cyfrowymi przedsiębiorstwa. Kluczowym obszarem pracy badawczej są aktywności przedsiębiorstwa, związane z planowaniem wdrożenia BC oraz zmianami stanu gotowości przedsiębiorstwa. Wynikiem badań jest model gotowości do wdrożenia BC – RM4DT (z ang.: *RM4DT – Readiness Model for Digital Twin*).

Wyróżnikiem dysertacji jest ujęcie analizowanego problemu w kontekście bliźniaków cyfrowych, co nie jest powszechne w dostępnej literaturze oraz praktyce, a jednocześnie pozostaje istotnym aspektem w rozwoju tejże gotowości. Rozpatrywane zależności pomiędzy poziomem dojrzałości organizacji, a zarządzaniem zasobami cyfrowymi, osadzono głównie w obszarze funkcjonowania przedsiębiorstw, choć przeprowadzane badania mają charakter uniwersalny i docelowo powinny objąć swoim zakresem również inne organizacje.

Analizy w dysertacji zostały przeprowadzone w ujęciach teoretycznym i praktycznym:

- a) porównanie istniejących opracowań akademickich i biznesowych w zakresie przedmiotowej tematyki,
- b) naświetlenie możliwości zastosowania istniejących i proponowanych w dysertacji technik i narzędzi w praktyce przedsiębiorstw.

W dysertacji badaniami objęto obszary zarządzania danymi i bliźniakami cyfrowymi, omówiono narzędzia oceny i poprawy jakości danych oraz praktyki ich stosowania, głównie z perspektywy podnoszenia poziomu dojrzałości cyfrowej.

Choć zrealizowane badania były skoncentrowane głównie na obszarze Polski (np. w ramach badań w oparciu o wywiady pogłębione), to wypracowane spostrzeżenia nie są ograniczone przestrzennie do terytorium jednego kraju, biorąc pod uwagę choćby bogatą bibliografię zagraniczną.

Dysertacja stanowi podsumowanie aktywności naukowej autora w obszarze gotowości, dojrzałości i konkurencyjności organizacji. Inspiracje do prowadzonych badań czerpano również z praktyki zawodowej w obszarze zarządzania przedsiębiorstwem oraz wdrażania nowoczesnych instrumentów w przedsiębiorstwach, m.in. w ramach czwartej rewolucji przemysłowej.

1.3 Cel badawczy dysertacji

W odpowiedzi na zdefiniowaną lukę badawczą, sformułowano następujący cel główny (poznawczy) dysertacji: opracowanie modelu gotowości, służącego określeniu stanu gotowości przedsiębiorstwa do uruchomienia wdrożenia BC i stanu docelowego z uwzględnieniem adekwatności i efektywności planowanego wdrożenia. Osiągnięcie celu głównego wymaga wykonania zadań badawczych, którym przypisano następujące cele szczegółowe, powiązane bezpośrednio z etapami opracowanej metodyki:

- a) zdefiniowanie wymiarów aktywności przedsiębiorstwa, wpływających na wdrożenie cyfrowego bliźniaka (C1),
- b) zidentyfikowanie parametrów oceny stanu przedsiębiorstwa w wymiarach dotyczących wdrażania cyfrowego bliźniaka (C2),
- c) określenie poziomów ryzyka i efektywności wdrożenia cyfrowego bliźniaka (C3).

Cele dysertacji określono w obszarach:

- a) poznawczym - polegającym na analizie materiałów wtórnych, badaniu synektycznym i wywiadach pogłębionych, by uporządkować wiedzę na temat gotowości i dojrzałości przedsiębiorstw i określić parametry pomiaru oraz zasoby sprzyjające transformacji cyfrowej,
- b) utylitarnym - polegającym na opracowaniu modelu gotowości przedsiębiorstw do wdrożenia BC, ukierunkowanego na wzrost konkurencyjności oraz narzędzia optymalizacji zakresu i skali transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa w kontekście gotowości do wdrożenia BC.

Założenia:

- a) Z1 - celem przedsiębiorstwa w dobie rewolucji przemysłowej jest podniesienie konkurencyjności poprzez zastosowanie niektórych zmieniających się paradygmatów wytwarzania i sprzedaży, w tym przede wszystkim: personalizacji, masowej kustomizacji, decentralizacji produkcji, kobotyzacji;
- b) Z2 - istniejące teoretyczne modele gotowości są obarczone uchybieniami w zakresie kompletności, precyzyjności, aktualności i adekwatności, co utrudnia ich stosowanie w przedsiębiorstwach różnej skali i z różnych segmentów gospodarki;
- c) Z3 - cyfrowe bliźniaki są zjawiskiem nowym, wymagającym wiedzy z wielu dyscyplin naukowych, lecz obiekt badań może być powtarzalny na wysokim poziomie uogólnienia, co determinuje nomotetyczne i interdyscyplinarne podejście do badań;

- d) Z4 - przedsiębiorstwa są zainteresowane wdrażaniem narzędzi transformacji cyfrowej w celu usprawnienia swojej działalności;
- e) Z5 - menadżerowie nie potrafią ocenić gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC, ani dobrać zakresu i skali wdrożenia bliźniaka cyfrowego do potrzeb przedsiębiorstwa;
- f) Z6 - zdolność przedsiębiorstw do korzystania z narzędzi transformacji cyfrowej, w tym bliźniaka cyfrowego, jest ważna dla ich konkurencyjności i odporności;
- g) Z7 - cyfrowe bliźniaki stanowią jeden z rodzajów narzędzi transformacji cyfrowej;
- h) Z8 - możliwość modyfikacji planowanego wdrożenia BC w zakresie wybranych parametrów obniża ryzyko nieadekwatności zakresu planowanego wdrożenia do celów przedsiębiorstwa;
- i) Z9 - nie wszystkie parametry gotowości i dojrzałości przedsiębiorstwa wpływają na gotowość do wdrożenia cyfrowego bliźniaka;
- j) Z10 - nie istnieje wspólny, jednakowy dla wszystkich przedsiębiorstw, docelowy poziom gotowości danych, technologii i dojrzałości zarządzania danymi.

1.4 Problem badawczy

W dysertacji przedstawiono wyniki analizy następujących aspektów transformacji cyfrowej przedsiębiorstw:

G – gotowość przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego (BC),

z – zmiana (wzrost) poziomu gotowości,

A – adekwatność planowanego wdrożenia BC do oczekiwanego przez przedsiębiorstwo stanu docelowego,

E – efektywność wdrożenia BC,

R – ryzyko, tj. poziom niepewności powodzenia inwestycji, polegającej na wdrożeniu BC.

Pierwszym krokiem walidacji modelu gotowości do wdrożenia BC jest przeanalizowanie w jaki sposób zmieni się gotowość cyfrowa przedsiębiorstwa w zależności od skali i zakresu cyfryzacji, towarzyszących wdrożeniu BC. Następnie wymagane jest zidentyfikowanie zależności między efektywnością (E) a zmianą poziomu gotowości cyfrowej (Gz) w kontekście zarządzania danymi. Wspólnym elementem obu zależności jest współczynnik adekwatności (A), określający poziom dopasowania parametrów wdrożenia do oczekiwanego stopnia poprawy stanu gotowości cyfrowej.

Podstawowym założeniem prezentowanych badań jest uwzględnienie współczynnika adekwatności podczas planowania transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa, jako czynnika wpływającego na poprawę trafności decyzji o fakcie i zakresie wdrożenia BC i korzystnie wpływającego na efektywność takiego wdrożenia.

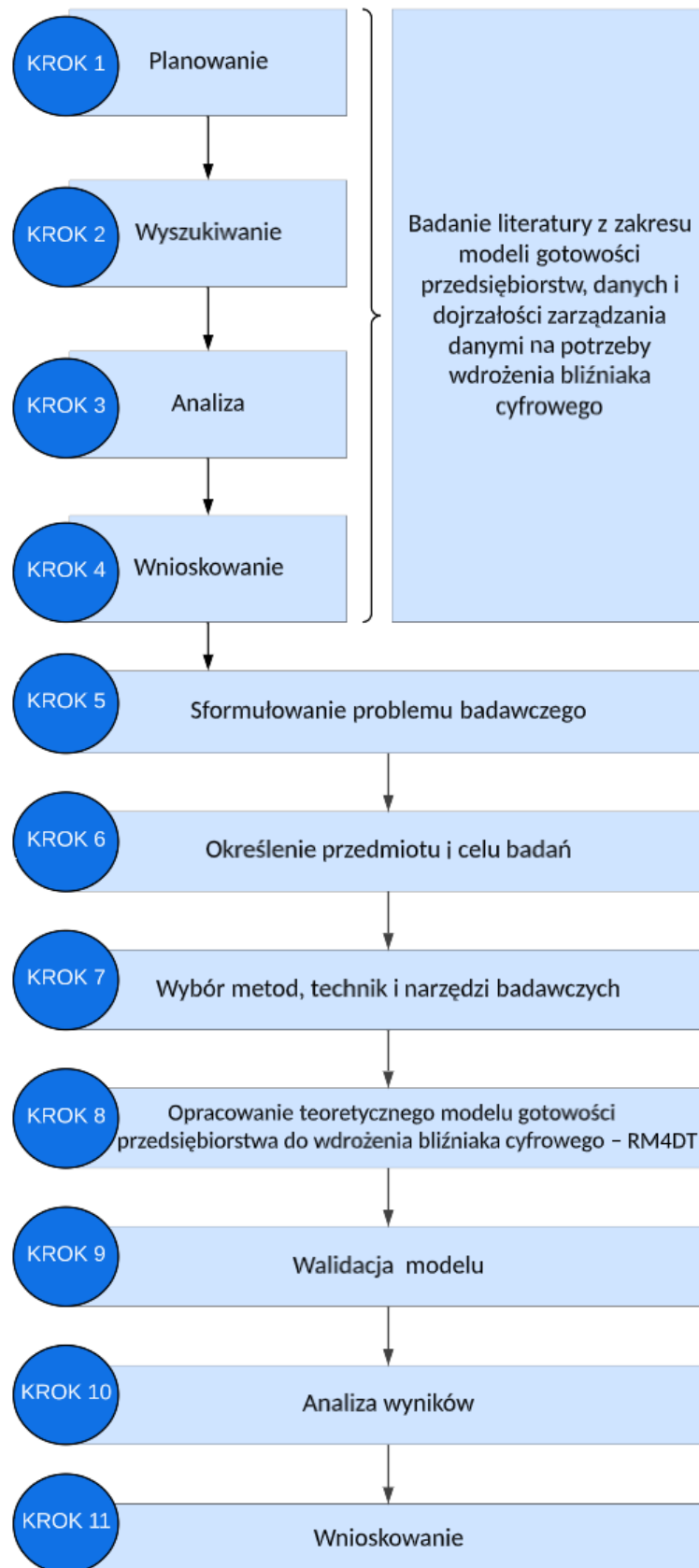
1.5 Pytania badawcze

Powyższe rozważania skutkowały zidentyfikowaniem luki badawczej, która została sformułowana w postaci następujących pytań badawczych (PB):

- PB1. Jakie wymiary gotowości przedsiębiorstw decydują o zasadności wdrożenia bliźniaka cyfrowego?
- PB2. Czym jest dojrzałość przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi?
- PB3. Jakie parametry można wyróżnić w zakresie gotowości danych, gotowości technologii i dojrzałości zarządzania danymi?
- PB4. Jak ocenić stan gotowości przedsiębiorstwa w kontekście wdrażania cyfrowego bliźniaka?
- PB5. Jak poprawić użyteczność wyników oceny gotowości przedsiębiorstwa w kontekście wdrażania BC?

1.6 Metoda realizacji celu dysertacji

Realizacja celu dysertacji wymagała podjęcia szeregu działań badawczych. Dążąc do ich uporządkowania opracowano cykl badawczy dysertacji, identyfikując kolejne zadania oraz zachodzące pomiędzy nimi związki przyczynowo - skutkowe. Rozprawa została oparta na koncepcji badań przedstawionej na Rys. 1.1.



Rys.1.1 Cykl badawczy prezentowany w dysertacji

Źródło: opracowanie własne

Analiza teoretyczna i synteza na potrzeby dysertacji została przeprowadzona w dziedzinie nauk społecznych na podstawie literatury z zakresu nauk o zarządzaniu i jakości z podstawowymi elementami nauk informatycznych.

W pierwszej kolejności, analiza ujawniła szereg luk badawczych, które wskazano w kolejnych rozdziałach. Powstałe problemy badawcze zostały rozwiązane za pomocą technik i narzędzi badawczych, wymienionych w rozdziale poniżej, dzięki czemu osiągnięto zakładane cele.

W pierwszym etapie badania literaturowego zidentyfikowano potrzeby dokonania analizy i syntezy literatury w zakresie konkretnych problemów, pojęć oraz ich kolokacji, co stanowi kluczowy element przeglądu literatury, bez którego przegląd literatury posiada znikomą wartość naukową (Kitchenham, 2004). Wynik tego etapu działań badawczych przedstawiono w rozdziale 1.1 rozprawy, gdzie tabela 1.1 przedstawia wyniki, stanowiące ramę zapotrzebowania na badanie literatury we wskazanych obszarach pojęciowych. Po zdefiniowaniu zakresu analizy i syntezy literatury, sformułowano pytania badawcze, które przedstawiono w postaci zbioru pytań badawczych (PB), gdzie PB_j oznacza j-te pytanie badawcze. Przeprowadzone w odniesieniu do sformułowanych pytań badawczych, badania literatury i ich wyniki przedstawiono w rozdziałach 2 i 3 rozprawy, które stanowią podstawę teoretyczną do opracowanych odpowiedzi na postawione pytania badawcze. Uzupełnienie podstawy teoretycznej przedstawiono w rozdziałach 4 oraz 5, gdzie w oparciu o dalsze etapy badań (synektyka, studium przypadku, formularz) uzupełniono odpowiedzi, uzyskane w drodze badań literatury, o aspekty empiryczne.

W drugim kroku badań, zaproponowano klasyfikację i strukturyzację środowiska semantycznego dla podjętego zakresu tematycznego w postaci definicji kluczowych pojęci i skrótów, uwzględniając pojęcia charakterystyczne dla środowiska pracy w przedsiębiorstwie wraz z obszarem pojęciowym zarządzania danymi przedsiębiorstw i ich atrybutami w kontekście bliźniaków cyfrowych. Początkowa pula terminów, fraz i kategorii została zawężona dzięki 2 równoczesnym wzajemnie zależnym procesom: a) porównywania i przeciwstawiania sobie terminów dotyczących cyfrowych bliźniaków, stosowanych w różnych branżach oraz b) usuwania nadmiarowości podobnych fraz.

Następnie, za pomocą analizy decyzji wielokryterialnej (MCDA), zaproponowana klasyfikacja została uszeregowana według priorytetów z perspektywy przedsiębiorstw i usystematyzowana w scenariusze wdrażania BC, w oparciu o założone cele dojrzałości cyfrowej w zakresie zarządzania danymi. W związku z tym zaprojektowano matrycę

pojęciową, z której usunięto najmniej ważne i zbędne elementy, a kluczowe atrybuty każdej kategorii i kroku podkreślono.

W kolejnym kroku zaproponowany model został skonfrontowany z praktykami w ramach eksperymentu empirycznego. Po eksploracyjnej i opisowej analizie biurkowej literatury źródłowej, przeprowadzono badania synektyczne w celu poprawy klasyfikacji i struktury modelu. Ten etap badania składał się z 3 wywiadów pogłębionych z menadżerami przedsiębiorstw, którzy zweryfikowali model, jego założone kryteria i cele oraz wskazali pracowników swoich przedsiębiorstw, których zaproszono na warsztaty synektyczne.

W ślad za wywiadami, przetestowane synektycznie scenariusze wdrażania BC z kroku 3 zostały zmapowane na model gotowości, w tym wymiary, parametry i procesy. Koncentrując się na uniwersalności modelu dla przedsiębiorstw, skontrastowano przypadki przedsiębiorstw z różnych lokalizacji i segmentów (usługi, handel, produkcja), aby zweryfikować potencjalną możliwość przenoszenia wniosków z tezy. Ten krok ujawnił uzupełniający horyzontalny atrybut niepewności na poszczególnych etapach transformacji (takich jak pozyskiwanie danych, przechowywanie danych, łączenie, prywatność, analiza ryzyka, podejmowanie decyzji w oparciu o fakty, walidacja).

Model powstały w wyniku poprzednich kroków został wzbogacony o obserwacje trybów awarii i efektów z 3 rzeczywistych projektów udostępniania danych między nauką a biznesem. Obserwacje pozwoliły wypełnić lukę badawczą, lecz jednocześnie rzuciły nowe światło na planowanie konkretnych scenariuszy wdrożenia bliźniaków cyfrowych i ujawniły nowe niewiadome dotyczące jakościowej i ilościowej dokładności proponowanego modelu. W związku z tym opisano nowe elementy luki badawczej i zasugerowano zalecenia dotyczące dalszych badań.

W realizacji zadań zaprezentowanych na Rys. 1.1, wykorzystano różnorodne metody, techniki i narzędzia badawcze, które w rezultacie doprowadziły do osiągnięcia założonego celu głównego. Przyjmując za J. Apanowiczem, że metoda badawcza jest konkretnym sposobem postępowania w określonej sytuacji problemowej w stosunku do sformułowanego problemu badawczego (Apanowicz, 2005, s. 55), w rozprawie wykorzystano następujące metody badawcze:

- a) metodę analizy i krytyki piśmiennictwa,
- b) metodę synektyki Gordona,
- c) metodę studium przypadku.

Poza wyszczególnionymi metodami badawczymi, w badaniach wykorzystano techniki badań, które przyjęto traktować jako podrzędne w stosunku do metody badawczej, stanowiące

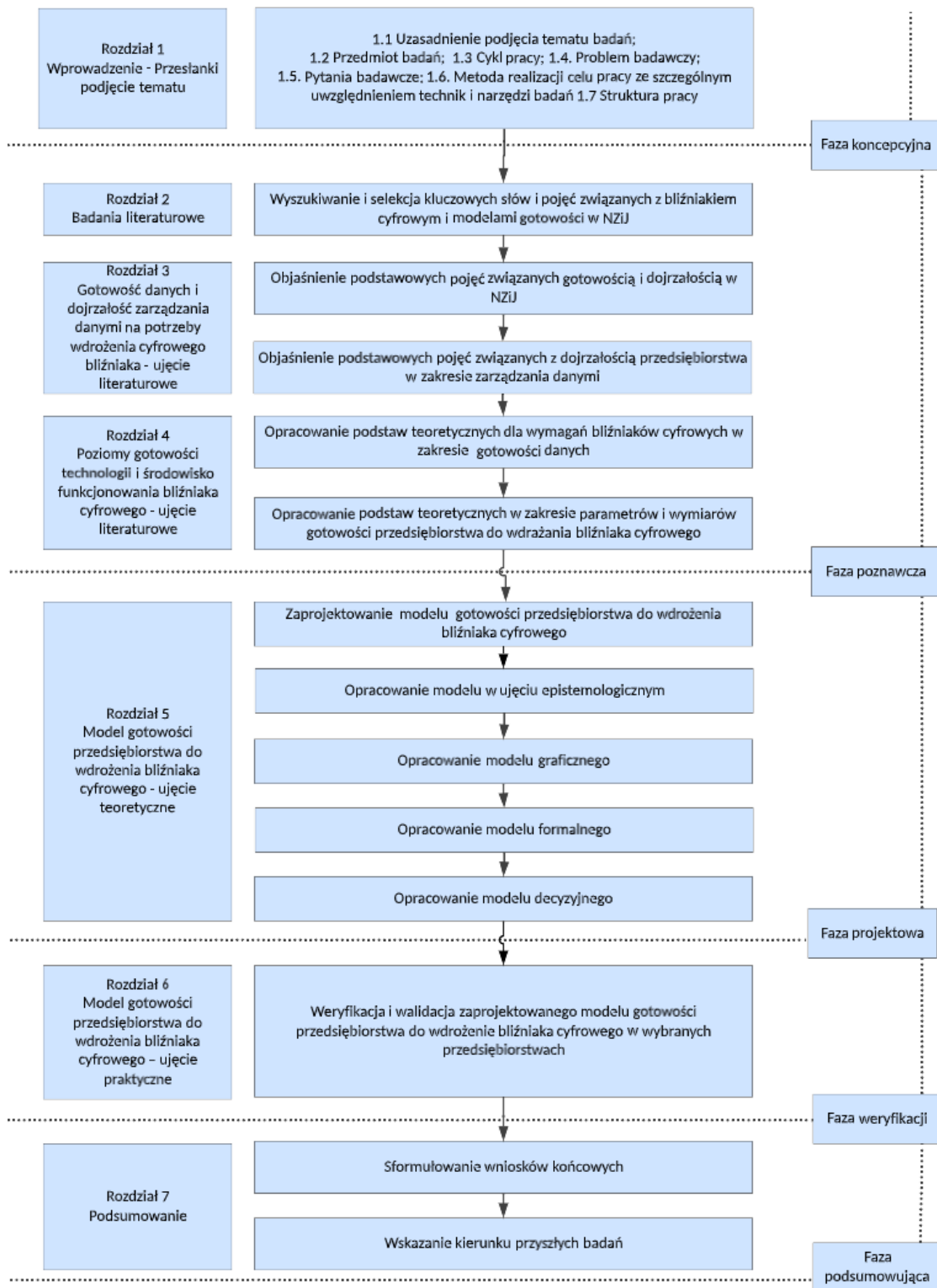
czynności wynikłe z przyjętych metod badawczych i przez nie uwarunkowane (Sławińska, Witczak, 2012, s. 104). W rozprawie wykorzystano następujące narzędzia badawcze:

- a) baza wyszukiwania Scopus,
- b) baza wyszukiwania Web of Science,
- c) tabela analizy morfologicznej,
- d) ujednolicony formularz wywiadu,
- e) arkusz kalkulacyjny MS EXCEL.

Oprócz wskazanych narzędzi badawczych wykorzystano również techniki badawcze, usprawniające prowadzenie badań naukowych (Apanowicz 2005, s. 58).

1.7 Struktura dysertacji

Struktura rozprawy odpowiada procesowi badawczemu (Rys. 1.1). Praca podzielona została na 6 rozdziałów, które reprezentują poszczególne fazy realizacji: koncepcyjną, poznawczą, projektową, weryfikacyjną i podsumowującą. Poszczególne fazy zostały wyszczególnione ze względu na cele szczegółowe rozprawy oraz podobieństwo użytych metod, technik i narzędzi badawczych. Szczegółowe powiązania pomiędzy poszczególnymi rozdziałami oraz fazami procesu realizacji rozprawy z określeniem podstawowych zadań, przedstawiono na Rys. 1.2.



Rys. 1.2. Struktura dysertacji

Źródło: opracowanie własne

W ramach fazy koncepcyjnej, w rozdziale pierwszym, przedstawiono lukę badawczą w zakresie modelu planowania zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC. W tej części rozprawy sformułowany został cel główny wraz z celami szczegółowymi oraz

przedstawiono przyjęte założenia. Zaprezentowano również cykl badawczy dysertacji, według którego rozprawa została zrealizowana. W aspekcie terminologii, wyzwaniem stał się brak jasnego rozróżnienia i nieprecyzyjne definiowanie pojęć *zdolności* (do realizacji określonych działań), *dojrzałości* (rozumianej jako poziom doskonałości w realizowaniu określonych działań) i *gotowości*.

Przebieg fazy poznawczej został przedstawiony w rozdziałach drugim, trzecim i czwartym. Drugi rozdział poświęcono przebiegowi i wynikom badania literatury w tym procedurze wyboru słów kluczowych i publikacji do pełnej analizy. W rozdziale trzecim opracowano podstawy teoretyczne dla RM4DT na poziomie przedsiębiorstwa, dokonując przy tym identyfikacji dostępnych w literaturze modeli dojrzałości przedsiębiorstw, uwzględniających zarządzanie danymi. Rozdział czwarty dotyczy funkcjonowania BC w przedsiębiorstwie. Przedstawiono aktualny stan zarządzania danymi w przedsiębiorstwach oraz potencjał związany z wdrażaniem BC. Uwaga została skoncentrowana na charakterystyce BC w aspekcie realizowanych procesów oraz zasobów, co było istotne w kontekście celu głównego rozprawy.

W rozdziale piątym przedstawiono rezultaty fazy projektowej, w ramach której przedstawiono propozycję modelu oceny gotowości, z opisem zastosowanych metod, technik i narzędzi badawczych.

W rozdziale szóstym opracowaną w uprzedniej części rozprawy metodykę, zweryfikowano empirycznie. Rozdział siódmy stanowi realizację fazy podsumowującej. Zawarto w nim podsumowanie, jak również wskazano dalsze kierunki badań.

W ostatniej części rozprawy umieszczono bibliografię, wykaz aktów prawnych, spis rysunków, tabel i załączników.

2. BADANIE LITERATURY

2.1 Procedura badania literatury

W celu realizacji zadań badawczych opracowano procedurę prowadzenia badań literatury, korzystając z metodyki (Werner-Lewandowska i Kosacka-Olejnik, 2020, s. 12), adaptującej podejścia, proponowane przez Denyer'ai Tranfield'a (Denyer i Tranfield, 2009) oraz Kitchenham'a (Kitchenham, 2004). Procedurę zastosowaną w rozprawie przedstawia Rys. 2.1.



Rys. 2.1. Procedura przeglądu literatury

Źródło: opracowanie własne (na podstawie Werner-Lewandowska i Kosacka-Olejnik, 2020)

Jak przedstawia Rys. 2.1, pierwszą część badań - przegląd literatury - zrealizowano w czterech etapach, obejmujących planowanie, wyszukiwanie, analizę oraz wnioskowanie. Analiza anglojęzycznych artykułów naukowych wskazuje na niewielką liczbę prac naukowych, adresujących zagadnienia poruszane w rozprawie.

2.2 Etap 1 – Planowanie

Etap planowania przeglądu literatury zrealizowano zgodnie z wytycznymi, usystematyzowanymi w postaci tabeli kryteriów, słów kluczowych i operatorów, korzystając w tym zakresie z przyjętych dobrych praktyk, w tym głównie z podejść Ruschel'a (2017) i Kitchenham'a (2004).

Tab. 2.1 Wytyczne dotyczące opracowania kryteriów selekcji

Nazwa kryterium	Opis kryterium
Słowa kluczowe	Terminy, wg których przeszukiwane będą źródła w określonym zakresie, uwzględniając synonimy czy alternatywne pisownie
Operatory logiczne	Operatory logiczne wykorzystywane na etapie wyszukiwania, zazwyczaj: LUB (ang. „OR”), ORAZ (ang. „AND”), BEZ (ang. „AND NOT”)
Zakres	Obszar, który będzie przeszukiwany wg wskazanego hasła, np. Tytuł, abstrakt, słowa kluczowe, tytuł publikacji, itp.
Czas	Ograniczenie dotyczące daty wydania opracowania
Język	Ograniczenie dotyczące języka opracowania
Typ publikacji	Ograniczenie dotyczące typu publikacji
Obszar badań	Ograniczenie dotyczące obszaru nauki np. ekonomia, zarządzanie, itp.
Kryteria włączenia/wyłączenia	Złożone inne kryteria kwalifikujące/wyłączające daną publikację

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ruschel i in. 2017, s. 181; Kitchenham 2004, s. 4-5)

Zgodnie ze strukturą przedstawioną w Tab. 2.1, przyjęto najczęściej stosowane w przeglądach literatury kryteria selekcji (Werner-Lewandowska i Kosacka-Olejek, 2020, s. 13), których format i poszczególne wartości zaadaptowano i zmodyfikowano na potrzeby rozprawy, co przedstawia Tabela 2.2. Przede wszystkim słowa kluczowe na potrzeby rozprawy stanowią frazy, kolokacje lub związki frazeologiczne w rozumieniu syntaktyki formalnej, czyli pojęcia szersze niż pojedyncze wyrazy. W rozprawie nierozłącznie traktowane pojęcia zostały wyłonię do wyszukiwania w przypadkach, gdzie wyszukiwane pojedynczych słów dawałoby

mylące wyniki, jak np. w przypadku frazy ‘bliźniak cyfrowy’, którego wyszukiwanie tylko w postaci łącznej może zaowocować oczekiwanymi wynikami, podczas gdy wyszukiwanie słów ‘bliźniak’ oraz ‘cyfrowy’ osobno byłoby pozbawione logicznego i merytorycznego uzasadnienia w kontekście tematu i celu dysertacji. Zatem w rozprawie, słowa kluczowe rozumiane jako frazy, stanowią pierwsze kryterium selekcji. Frazy te podzielono na bezpośrednio związane z przedmiotem badań, obszarem badawczym, kontekstem pomiaru i oceny oraz pytaniami badawczymi.

Tab. 2.2. Kryteria selekcji słów kluczowych

Nr	Kryterium	Opis		
		ID	Słowo kluczowe	Synonim
I.	Słowa kluczowe	1	Pojęcia bezpośrednio związane z przedmiotem badań	
		1.1	readiness	capability
		1.2	maturity	
		2	Pojęcia związane z obszarem badawczym	
		2.1	enterprise	company
		2.2	industry 4.0	industrie 4.0
		2.3	digital twin	digital twinning
		3	Pojęcia związane z kontekstem pomiaru i oceny	
		3.1	model	
		3.2	method	
		3.2	assessment	
		3.4	criteria	
		3.5	parameters	characteristics
		3.6	dimensions	angles
		3.7	categories	segments
		3.8	levels	stages
		4	Pojęcia związane z pytaniami badawczymi	
		4.1	decision making	
		4.2	data management	data governance
		4.3	data readiness	
		4.4	technology readiness	
		4.5	data sharing	
		4.6	lifecycle	scenario
		II.	Operatory logiczne i formalne	Operator
AND	Kombinacje haseł: (ID1, ID2); (ID2, ID3, ID4)			
OR	Wyrażanie synonimów haseł, pojęć, alternatywnych pisowni			
*	wyrażenie brakującego elementu wyrazu lub frazy o dowolnej treści, najczęściej w postaci zakończenia fleksyjnego			

III.	Zakres	tytuł, słowa kluczowe, abstrakt
IV.	Czas	do roku 2022 włącznie
V.	Język	j. angielski
VI.	Typ publikacji	bez ograniczeń
VII.	Obszar badań	nauki ekonomiczne, zarządzanie, nauki społeczne, podejmowanie decyzji, inżynieria, nauki techniczne
VIII.	Kryteria włączenia do analizy	KW1: Opracowania dotyczące oceny/pomiaru/ewaluacji procesów/parametrów i/lub gotowości/dojrzałości do wdrażania/eksploatacji nowych technologii/bliźniaka cyfrowego z wykorzystaniem modelu gotowości/dojrzałości
		KW2: Gotowość/dojrzałość jest badana w wymiarach gotowości danych i/lub gotowości technologii i/lub dojrzałości zarządzania danymi

Zródło: opracowanie własne

Na etapie planowania wyłoniono cztery grupy słów kluczowych, wymienione w Tabeli 2.2. Były to:

- a) pojęcia bezpośrednio związane z przedmiotem badań,
- b) pojęcia związane z obszarem badawczym,
- c) pojęcia związane z kontekstem pomiaru i oceny,
- d) pojęcia związane z pytaniami badawczymi.

Słowa i pojęcia kluczowe zostały wyłonione w drodze burzy mózgów z udziałem przedstawicieli przedsiębiorstw. W pierwszej grupie słów kluczowych umieszczono pojęcia bezpośrednio związane z przedmiotem badań oraz pojęcia i frazy, mogące stanowić ich synonimy. Te słowa kluczowe oraz ich kombinacje ze słowami z grupy drugiej, tj. z pojęciami określającymi obszary badawcze, stanowią grupę słów kluczowych dominujących, których obecność w kryteriach włączenia jest niezbędna. Trzy kolejne grupy słów kluczowych w Tabeli 2.2 (ID 2, 3, 4) stanowią grupy uzupełniających słów kluczowych. Stanowią one określenia, związane ze środowiskiem oraz różnymi kontekstami głównego przedmiotu badań. Wszystkie grupy słów kluczowych zostały pogrupowane wg obszarów semantyczno-logicznych w taki sposób, aby zapewnić wysoką skuteczność tworzenia ich kombinacji przy użyciu operatorów.

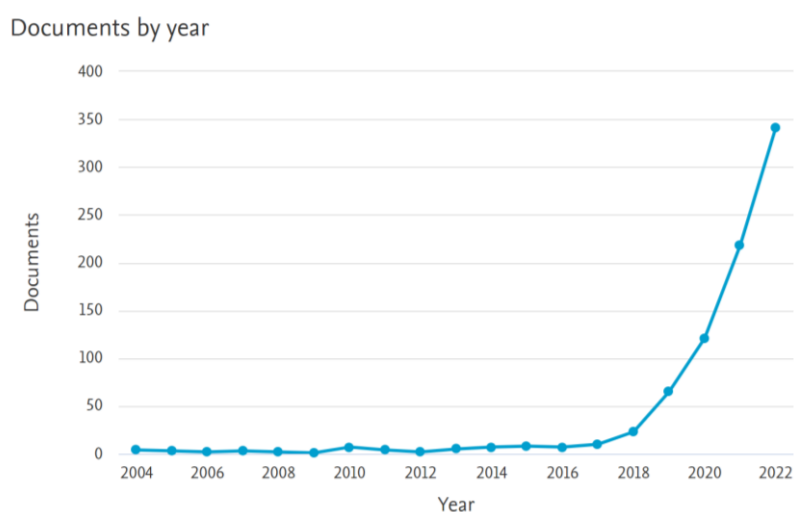
Operatory logiczne i formalne stanowią drugie kryterium selekcji, w którym umieszczono operatory AND, OR oraz wieloznacznik *. Operatory te pozwoliły tworzyć liczne kombinacje słów kluczowych, co było niezbędnym etapem, rozszerzającym zakres prowadzonego przeglądu literatury. Zakres badania określono z uwzględnieniem tytułów, abstraktów, jak i słów kluczowych przeszukiwanych publikacji. Tak szeroki zakres analizy umożliwił identyfikację jednostek w sposób nieoczywisty związanych z głównym nurtem

badania, które w kilku przypadkach wniosły zupełnie nową perspektywę, niewątpliwie podnosząc wartość prowadzonego przeglądu. Kategorie czasu i typu publikacji ustalono w możliwie jak najszerszym zakresie ze względu na interdyscyplinarny i uniwersalny charakter przedmiotu i celu badań, przy którym ograniczenia w wymiarach czasu i typu mogłyby skutkować fundamentalnymi brakami merytorycznymi. Jako domyślny język analizy wybrano język angielski ze względu na etymologiczną bliskość dominujących pojęć kluczowych z tym językiem. Niemniej publikacje polskie, zawierające streszczenia lub słowa kluczowe w języku angielskim, również zostały włączone do analizy. Typ i kryteria włączenia publikacji do analizy zostały zdefiniowane z uwzględnieniem zarówno przedmiotu badania, jak i jego interdyscyplinarnego i uniwersalnego charakteru, który determinował wyjście poza nauki o zarządzaniu. Z tego powodu przy ustalaniu obszarów i kryteriów włączenia uwzględniono pojęcia, stanowiące płaszczyznę wspólną nauk technicznych i społecznych, jak np. ‘dojrzałość zarządzania danymi’ czy ‘metody współdzielenia danych’.

W ostatnim kroku etapu planowania wybrano dwie bazy wyszukiwania publikacji: Web of Science oraz Scopus.

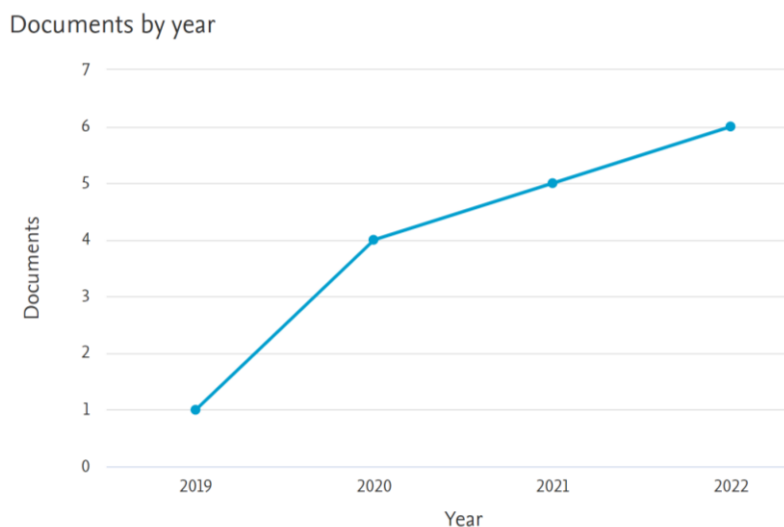
2.3 Etap 2 – Wyszukiwanie

W pierwszej fazie selekcji wyszukiwania wyłonione na potrzeby rozprawy pojęcia, słowa kluczowe i frazy zostały wprowadzone do wyszukiwarki artykułów naukowych SCOPUS, aby sprawdzić, jak często pojawiają się one w literaturze oraz jak kształtuje się ich występowanie na linii czasu. Wyszukiwanie było prowadzone w zawężeniu do nauk o zarządzaniu i jakości. Przykładowe wyniki przedstawiają Rys. 2.2, 2.3, 2.4.



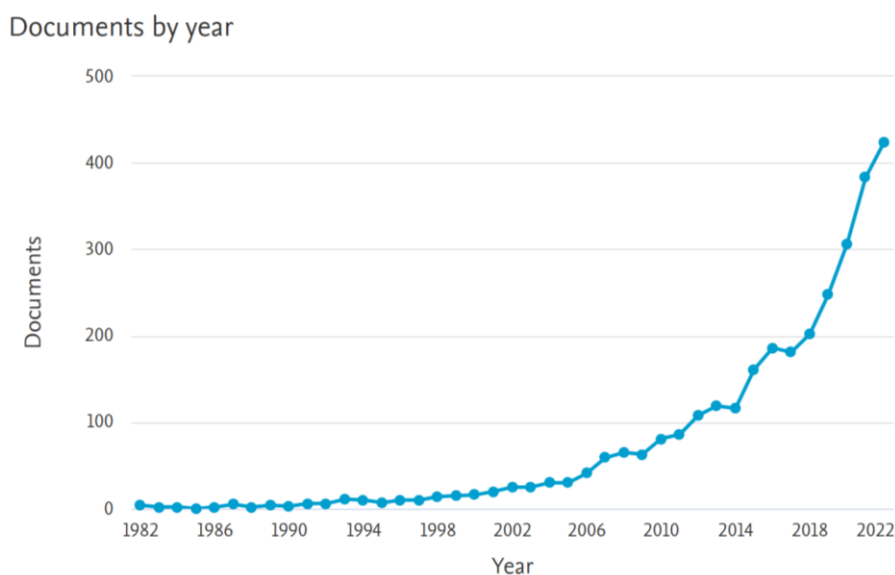
Rys. 2.2. Wynik wyszukiwania słów ‘digital twin’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu

Źródło: www.scopus.com, 17.10.2022 r.



Rys. 2.3. Wynik wyszukiwania słów ‘digital twin’ i ‘readiness model’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu

Źródło: www.scopus.com, 17.10.2022 r.



Rys. 2.4. Wynik wyszukiwania słów ‘readiness model’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu

Źródło: www.scopus.com, 17.12.2022 r.

W ten sposób spośród 36 wyłonionych wstępnie pojęć wyeliminowano 17 o najsłabszym trendzie wzrostu w czasie, pozostawiając 19 pojęć do dalszej analizy.

W drugiej fazie wyszukiwania, poprzez wprowadzenie do wyszukiwarek Scopus oraz Web of Science, analizie poddano następujące pojęcia i zwroty:

- a) industrial data sharing model,

- b) digital twin data sharing,
- c) industry 4.0 management model,
- d) industry 4.0 decision making system,
- e) industry 4.0 digital twin,
- f) digital twin entry criteria,
- g) digital maturity assessment method,
- h) data sharing reference model,
- i) industrial data lifecycle,
- j) industry 4.0 segmentation,
- k) digital twinning industrial scenario,
- l) industrial data sharing tools,
- m) industrial data sharing methods,
- n) industrial data sharing tools or methods,
- o) data management criteria,
- p) data suitability for digital twinning,
- q) Industry 4.0 market segmentation/characteristics in Poland,
- r) digital twin readiness model,
- s) digital twin maturity model.

Wyniki uzyskane w tej fazie wyszukiwania przedstawia Tabela 2.3.

Tab. 2.3. Wyniki drugiej fazy selekcji wyszukiwania publikacji

Narzędzie	Brak publikacji (0 publikacji)	Mało publikacji (od 1 do 50)	Umiarkowana liczba publikacji (od 51 do 600)	Dużo publikacji (powyżej 600)
	<i>digital twin AND entry criteri*</i>	<i>industr* AND data sharing tool</i>	<i>industrial data AND lifecycle</i>	<i>digital twinning AND data</i>
WoS	0	1	161	1983
Scopus	0	1	21	82
	<i>digital twin AND entry AND criteri*</i>	<i>data management criteria</i>	<i>industry 4.0 AND decision making system</i>	<i>industry 4.0 AND management AND model</i>
WoS	0	2	162	2260
Scopus	0	2	22	1726
	<i>digital maturity assessment method</i>	<i>digital twinning AND scenario AND industr*</i>	<i>data sharing AND reference model</i>	<i>maturity assessment AND digital</i>
WoS	0	7	29	1057

Scopus	0	5	39	117
	<i>data sharing reference model</i>	<i>Industry 4.0 AND poland AND characteristic</i>	<i>digital twin* AND data sharing</i>	<i>industry 4.0 AND digital twin</i>
WoS	0	1	48	937
Scopus	0	6	42	80
	<i>industrial data lifecycle</i>	<i>industr* AND data sharing method</i>	<i>industry 4.0 AND management model*</i>	<i>industr* AND data sharing AND method</i>
WoS	0	33	68	417
Scopus	0	9	60	415
	<i>industry 4.0 segmentation</i>	<i>industr* AND data sharing tool OR data sharing method</i>	<i>industr* AND data sharing AND tool</i>	<i>industry 4.0 AND digital twin</i>
WoS	0	33	112	937
Scopus	0	10	271	942
	<i>digital twinning industrial scenario</i>	<i>industrial AND data AND sharing model</i>	<i>digital twin AND data AND sharing</i>	<i>Industry 4.0 AND decision making AND system</i>
WoS	0	21	116	746
Scopus	0	15	102	985
	<i>Industry 4.0 characteristic* AND poland</i>	<i>Industry 4.0 AND poland AND market</i>	<i>industry 4.0 AND segmentation</i>	<i>industrial AND data AND sharing AND model</i>
WoS	0	23	79	1462
Scopus	0	17	103	1039
	<i>industrial data sharing tools</i>	<i>digital twinning AND industrial scenario</i>	<i>industrial AND data sharing AND tool</i>	<i>industrial AND data AND lifecycle</i>
WoS	0	1	486	1232
Scopus	0	0	86	1087
	<i>industrial data sharing methods</i>			<i>data management AND criteri*</i>
WoS	0			1962
Scopus	0			1142
	<i>digital twinning AND data suitability</i>			<i>industry 4.0 AND decision making</i>
WoS	0			1521
Scopus	0			1424
	<i>digital twinning AND data suitability*</i>			
WoS	0			
Scopus	0			
	<i>Industry 4.0 market segmentation</i>			

	AND <i>poland</i>			
WoS	0			
Scopus	0			

Źródło: Opracowanie własne.

Zakładając istnienie proporcjonalnej zależności między liczbą wyników wyszukiwania a poziomem zbadania obszaru reprezentowanego przez słowa kluczowe, analizowane słowa, frazy i kolokacje pogrupowano wg czterech kategorii w zależności od liczby publikacji, zawierających te słowa lub pojęcia, a każdej kategorii przypisano określoną liczbę odnoszących się do niej publikacji:

- a) dużo publikacji - powyżej 600 artykułów,
- b) umiarkowana liczba publikacji - od 51 do 600 artykułów,
- c) mało publikacji - od 1 do 50 artykułów,
- d) brak publikacji - 0 artykułów.

Na potrzeby rozprawy przyjęto założenie, że im więcej artykułów odnosi się do konkretnego słowa kluczowego lub frazy, tym lepiej zbadane zostały zagadnienia związane z tym słowem kluczowym lub frazą, podczas gdy zero artykułów oznacza albo brak pokrycia w literaturze, albo błędną definicję słowa kluczowego. Uzyskane pojęcia posegregowano, połączono w logiczne zwroty, a w nielicznych przypadkach uzupełniono o atrybuty, wymagane dla uzyskania spójnych fraz. Uzyskane w ten sposób frazy poddano trzeciej fazie selekcji.

W trzeciej fazie selekcji wyszukiwania wyniki poddano selekcji analogicznie do fazy drugiej - polegającej na redukcji pojęć, dla których uzyskano zero lub dużo (ponad 600) wyników, jednak przed odrzuceniem wyszukanych publikacji poddano je wrywkowej analizie abstraktów, włączając do następnej fazy wybrane pozycje, pochodzące z grupy publikacji, zawierających słowa kluczowe, dla których znaleziono dużo (ponad 600) wyników. Takie hybrydowe ilościowo-jakościowe podejście do selekcji pozwoliło poszerzyć przedmiot analizy o nie nowe i szeroko obecne w literaturze, lecz ważne dla rozprawy pozycje.

W ostatniej fazie wyszukiwania rzadko występujące w literaturze słowa kluczowe, dla których znaleziono mało wyników, uznano za najciekawszy obszar do analizy i poświęcono im największą uwagę. Słowa kluczowe i frazy nie pojawiające się w literaturze nie stanowią przedmiotu rozprawy. Ze względu na nadużywanie, lub całkowity brak występowania następujących pojęć i zwrotów w literaturze, nie stanowią one przedmiotu szczególnej uwagi w rozprawie:

- a) digital twin AND input AND criteria,
- b) digital twin AND data suitability,

- c) digital twin AND input criteria,
- d) digital twin AND industry scenario,
- e) Poland AND segmentation of industry 4.0 market,
- f) Poland AND industry 4.0 characteristics,
- g) digital twin industrial scenario,
- h) industrial data sharing tools,
- i) industrial data sharing methods,
- j) digital maturity assessment method,
- k) data sharing reference model,
- l) industrial data lifecycle,
- m) industry 4.0 segmentation.

Obszarom pojęciowym, dla których znaleziono dużą liczbę wyników, poświęcono w dysertacji niewielką uwagę, ponieważ zostały uznane za nadużywane, albo interpretowane zbyt szeroko, aby można je było skrupulatnie zbadać. Wyniki poddano redukcji duplikatów, a także publikacji spełniających kryteria formalne, lecz wykraczających poza ramy merytoryczne rozprawy. Zidentyfikowane w wyniku wyszukiwania publikacje trafiły do kolejnego etapu badań, tj. do analizy.

2.4 Etap 3 - Analiza

Wyselekcjonowane publikacje poddano szczegółowej analizie, mając na uwadze uprzednio zdefiniowane pytania badawcze. Po analizie pełnych tekstów, wykorzystując regułę kuli śnieżnej, uwzględniono cytowane w analizowanych materiałach inne publikacje, co dało możliwość zidentyfikowania dodatkowych opracowań, które nie znalazły się w bazach uwzględnionych w badaniach.

W związku z powyższą analizą bibliometryczną, w rozprawie następujące pojęcia zostały potraktowane ze szczególną uwagą, ponieważ ich umiarkowane częste występowanie w publikacjach, świadczy o dużym potencjale i potrzebie kontynuowania analiz. Były to publikacje, skoncentrowane na następujących pojęciach:

- a) data management criteria,
- b) industry AND data sharing models,
- c) industry AND data governance method,
- d) industry AND data sharing models OR data management method,
- e) industry AND data readiness OR governance model,

- f) industry AND scenario AND digital twin,
- g) medical digital twin,
- h) industry 4.0 AND characteristics,
- i) industry 4.0 AND maturity assessment.

W wyniku tych aktywności uzyskano zbiór publikacji, stanowiący trzon opracowania wniosków z badania literatury.

2.5 Etap 4 - Wnioskowanie

Przekazane do etapu wnioskowania publikacje pozwoliły uzyskać odpowiedzi teoretyczne na postawione pytania badawcze, o czym szczegółowo traktują dalsze rozdziały rozprawy. Zgodnie z przyjętymi na etapie planowania założeniami uzyskano wielowymiarowy przegląd literatury, którego różnorodność jest zauważalna tak w aspekcie geograficzno-czasowym, jak i w przekroju dyscyplin naukowych. Uzyskane publikacje pochodzą z czterech kontynentów. Najstarsze z nich, stanowiące teoretyczne podstawy semantyczne, sięgają lat 50-tych, podczas gdy większość to artykuły nie starsze niż 4 lata (mieszczące się w przedziale lat 2018-2022). Podczas gdy większość autorów publikacji posiada stopnie naukowe, w wynikach wyszukiwani nie zabrakło publikacji naukowych spoza głównego nurtu badań, jak np. publikacje centr badawczych agend rządowych (np. Departament Obrony USA, NASA), czy publikacje firm konsultingowych (np. normy ISO, PwC, Deloitte). O różnorodności wyników świadczy również ich interdyscyplinarność. Podczas gdy wyniki zostały zdominowane przez nauki społeczne o zarządzaniu, część publikacji pochodzi od ekspertów z dziedziny nauk technicznych o informatyce, a pojedyncze pochodzą z obszaru nauk medycznych oraz językoznawstwa.

Wykorzystując powyższe obserwacje i własne doświadczenia zawodowe autor, zidentyfikował lukę badawczą w obszarze metodyki, pozwalającej na neutralizację niepewności związanej z podjęciem przez przedsiębiorstwo decyzji o zakresie i skali wdrożenia BC. Punkt wyjścia do proponowanego w rozprawie modelu gotowości stanowią zaobserwowane niedobory w literaturze, jak i w istniejących modelach gotowości przedsiębiorstw, a także brak odniesienia ich do adekwatności zakresu, skali i narzędzi cyfryzacji do oczekiwanych rezultatów. W związku z tym w niniejszej dysertacji przyjęto założenie, że model gotowości przedsiębiorstwa, nastawiony na osiągnięcie optymalnego, a nie jak najwyższego poziomu, zakresu i skali zaawansowania danych, może w istotnym stopniu poprawić trafność decyzji o wdrożeniu BC.

3. DOJRZAŁOŚĆ ZARZĄDZANIA DANYMI NA POTRZEBY WDROŻENIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE LITERATUROWE

3.1 Pojęcie gotowości w naukach o zarządzaniu

Pierwsze wzmianki na temat gotowości w kontekście zarządzania zmianą w organizacji można znaleźć w 1986 roku. Ówczesna analiza dotyczyła gotowości personelu do wprowadzenia zmian. Zbadano 777 pracowników przy użyciu ankiety. Opracowywany wówczas wskaźnik gotowości personelu do zmiany miał zostać włączony do opracowanego wcześniej modelu zarządzania zmianą w organizacji (Keith, 1986).

Pojęcie gotowości jest analizowane przez szereg dyscyplin naukowych, w tym nauki o zarządzaniu, nauki techniczne, nauki medyczne. W każdej z dyscyplin gotowość definiowana jest różnie w różnych kontekstach i kolokacjach. Niemniej, w każdej z dyscyplin wspólny mianownik definicji gotowości stanowi relacja gotowości do czterech atrybutów zmiany:

- a) przedmiot zmiany – co się zmienia?
- b) proces zmiany – jak przebiega zmiana?
- c) kontekst zmiany – gdzie dokonuje się zmiana?
- d) osoby zaangażowane w zmianę – kto uczestniczy w zmianie? (Weiner, 2009).

Nauki o zarządzaniu definiują gotowość jako zdolność przejścia do określonego stanu, a ocenę gotowości przedsiębiorstwa jako usystematyzowaną analizę zdolności przedsiębiorstwa do zmiany i przejścia do określonego nowego stanu (Johnk i in., 2021).

W naukach o zarządzaniu pojęcie gotowości stosowane jest w kolokacji z:

- a) z dopełnieniem, np. gotowość do wdrożenia zasad gospodarki cyrkularnej (McAloone i Pigosso, 2021), lub
- b) z przymiotnikiem, np. gotowość organizacyjna (Javed i in., 2022), lub
- c) z rzeczownikiem w funkcji podmiotu, np. gotowość danych.

W zależności od celu, bieżącą ocenę gotowości można przeprowadzić na różnych poziomach struktury ekosystemu - na poziomie jednego przedsiębiorstwa, wielu przedsiębiorstw, regionu kraju, lub na poziomie poszczególnych pracowników przedsiębiorstwa. Oceny gotowości dokonuje się w podejściu jakościowym (np. wywiady),

ilościowym (np. ankiety) lub mieszanym. Każdorazowo szczególną uwagę należy zwrócić na wiarygodność wyników (Armenakis i in., 2007).

Z przeprowadzonego w 2020 roku zestawienia trzydziestu modeli gotowości do uzyskania korzyści z wdrażania technologii Przemysłu 4.0, podobnych do BC, wynika, że kryteria oceny gotowości przedsiębiorstw w wymiarach technologicznych dominują nad pozostałymi pięcioma wymiarami zbiorczymi, jak ludzie, procesy, strategia, przywództwo, innowacje (Mansoor, Mohd i Nor, 2020). Celem analizy była przede wszystkim identyfikacja parametrów oceny stosowanych w modelach gotowości, a nie identyfikacja samych modeli. Technologii dotyczyło 70 z 158, tj. 44%, parametrów oceny gotowości, stosowanych w różnych modelach gotowości. Zdaniem Mansoor, Mohd i Nor stanowi to wyraźne wskazanie dla przedsiębiorstw, że aby przejść na Przemysł 4.0, powinny przede wszystkim skoncentrować swoje działania na wzmocnieniu swojej gotowości technologicznej (Mansoor, Mohd i Nor, 2020).

3.2 Pojęcie dojrzałości w naukach o zarządzaniu i jakości

3.2.1 Przesłanki do budowania modeli dojrzałości

Rosnąca dynamika transformacji cyfrowej na wielu poziomach i w licznych obszarach życia stawia przedsiębiorstwa przed koniecznością wprowadzania coraz bardziej zaawansowanych narzędzi cyfrowych do codziennej praktyki biznesowej. O ile nabycie licencji na oprogramowanie sprawdza się w rozwiązywaniu niektórych doraźnych problemów, o tyle złożone problemy o trwałym charakterze nie ulegają prostym ani punktowym rozwiązaniom. Przeciwnie, wymagają zaplanowanego, konsekwentnego i systematycznego działania (Lacerda i Wangenheim, 2018). Jednakże opracowanie i wdrożenie strategicznych zmian cyfryzacyjnych jest długotrwałe i kosztowne, przez co zwykle wymaga podzielenia na etapy. Kolejność tych etapów oraz sekwencje czynności każdego z nich stanowią sedno modeli dojrzałości. Dlatego, w podejmowaniu decyzji, związanych z wdrażaniem bliźniaka cyfrowego, podobnie jak innych narzędzi transformacji cyfrowej, pomocny jest model dojrzałości cyfrowej, który przed podjęciem decyzji o wdrożeniu pomaga:

- a) zaplanować transformację cyfrową w działach przedsiębiorstw, zaangażowanych we wdrożenie,
- b) zarysować korzyści i nakłady związane z planowanymi podniesieniem dojrzałości,

- c) obniżyć ryzyko niepowodzenia planowanego wdrożenia,
- d) zoptymalizować nakłady na transformację cyfrową adekwatnie do oczekiwanych korzyści.

Niewiele przedsiębiorstw posiada zdolność skutecznego korzystania z narzędzi cyfrowych, zarządzania danymi czy planowania podnoszenia poziomu dojrzałości w zakresie zarządzania danymi. Tymczasem, skuteczna integracja narzędzi cyfrowych z istniejącymi i trwającymi procesami biznesowymi wymaga planowania strategicznego, uwzględniającego zmiany w zarządzaniu danymi i innymi aktywami cyfrowymi w skali całego przedsiębiorstwa (Eren i in., 2022.).

Model dojrzałości cyfrowej pozwala ograniczyć zakres i skalę transformacji cyfrowej adekwatnie do oczekiwanych efektów. W obliczu braku modelu i narzędzi jego implementacji, przedsiębiorstwo zmuszone jest funkcjonować pomiędzy dwoma skrajnymi podejściami – chaotycznym a kompleksowym. W podejściu chaotycznym przedsiębiorstwo nabywa narzędzia i implementuje je doraźnie i wybiórczo, nie zważając na wpływ ani potencjał wdrażanego narzędzia na obszary aktywności spoza rozwiązywanego problemu. W podejściu kompleksowym przedsiębiorstwo planuje transformację cyfrową wszystkich obszarów aktywności z zamiarem osiągnięcia najwyższego z możliwych poziomu dojrzałości w każdym z obszarów. Żadne ze skrajnych podejść nie zapewnia działań w pełni uzasadnionych ekonomicznie, biznesowo ani społecznie.

Trudno przewidzieć wyzwania i bariery, jakie pojawią się podczas transformacji cyfrowej, tworząc model jeszcze przed rozpoczęciem wdrożenia. Mimo to, przed rozpoczęciem transformacji konieczny jest wybór technologii, narzędzi i choćby ogólnego scenariusza transformacji. Problem analityczny o dużej złożoności wymagać będzie innych technologii i narzędzi niż problem analityczny, przetwarzający duże ilości danych, ale o stosunkowo prostej architekturze. Wybór narzędzi o podwyższonej tolerancji na błędne dane może sprawdzić się w prognozowaniu zmian przestrzennych miasta, ale ten sam poziom tolerancji na błędy byłby katastrofalny w skutkach podczas symulacji zderzeń wielowagonowych (Eren, 2019). Dlatego też planowanie wdrożenia BC polega nie tyle na wyborze konkretnych narzędzi, co na dostosowaniu podejść technologicznych do rodzaju i charakteru wyzwań, jakie mogą się pojawić. Dzięki zastosowaniu modeli dojrzałości, opracowanych w oparciu o podobne scenariusze transformacji i wdrożeń, można zmniejszyć ryzyko nieprawidłowego doboru narzędzi, procesów i niepowodzenia transformacji.

Model powyżej warstwy wspólnej, tworzony jest w oparciu o dostępne dane. Stąd, trudna do przewidzenia jest jego skuteczność w rozmaitych zmiennych warunkach, w jakich

powinien funkcjonować w trakcie wdrożenia. Choć BC stanowi odzwierciedlenie rzeczywistych obiektów i procesów, to tworzony jest najczęściej z zamiarem testowania go w warunkach, które na moment planowania nie są określone. Niedeterministyczny charakter komponentów BC, wynikający z trudnych do powtórzenia warunków pracy i czynników na nie oddziałujących, bardzo utrudniają testowanie i weryfikację samego systemu. Stąd, uzasadnione wydaje się testowanie BC w kontekście modelu dojrzałości i w odniesieniu do parametrów biznesowych, a nie czysto technicznych (Ozkaya, 2020, s. 5).

Przeprowadzona przez amerykańskie siły powietrzne w oparciu o dedykowany model dojrzałości analiza kompleksowego wdrożenia BC wykazała, że o ile wartość merytoryczna uzyskanej wiedzy byłaby znaczna, o tyle przeprowadzenie takiego przedsięwzięcia byłoby niezwykle złożonym, wręcz niewykonalnym zadaniem. Analizie poddano wytworzenie bliźniaka cyfrowego, kompleksowo wspierającego rozwój systemów obronnych. Oprócz niezbędnych zasobów ludzkich w szacunkach uwzględniono niezbędne oprogramowanie oraz zasoby obliczeniowe. Pierwszym celem funkcjonowania BC miałyby być opracowanie modelu statku powietrznego, który zapewniłby dominację w przestrzeni powietrznej - NGAD (z ang.: *Next Generation Air Dominance*). Użyty w ramach projektu COCOMO II model dojrzałości wykazał, że dla takiego przedsięwzięcia koszt wytworzenia i utrzymania wirtualnego systemu typu cyfrowa nić kształtowałby się między 80 mld dolarów a 180 mld dolarów. Natomiast uruchomienie i utrzymanie cyfrowego bliźniaka wiązałoby się z kosztami rzędu 1,5 trylionu dolarów, czyli przewyższyłoby połączony budżet marynarki powietrznej *Air Force* i morskiej *Navy*. Przekładając to na język zasobów, do takiego projektu należałoby dedykować zespół wielkości trzeciej części korporacji Microsoft. Takiej skali zespół potrzebowałby od 100 do 250 lat na ukończenie cyfrowego bliźniaka (West i Blackburn, 2017, s. 55). Niestety, analizy COCOMO II nie obejmowały aktualnego ani oczekiwanego poziomu dojrzałości cyfrowej. Nie poddano też weryfikacji możliwości wybiórczego wdrożenia adekwatnego BC, który obejmowałby tylko niezbędne aspekty transformacji i dopasowywał poziom aspiracji do oczekiwanych efektów. Ponadto, pojęcie BC było wykorzystywane w sposób dowolny, wręcz chaotyczny i zastępowało dowolny element oprogramowania, służącego z góry określonymu celowi, mimo że w dużym stopniu opisywana funkcjonalność obejmowała wytworzenie sztucznej inteligencji – systemu wirtualnego funkcjonującego samodzielnie bez fizycznego odpowiednika. W rezultacie projekt BC w amerykańskim lotnictwie porzucono.

W odróżnieniu od przywołanego przykładu gruntownie przemyślanej rezygnacji z wdrożenia BC w amerykańskiej marynarce wojennej, wiele modeli dojrzałości, budowanych pod kątem oprogramowania jest nadmiernie skoncentrowanych na zapewnieniu standardów

oraz wymagań ładu korporacyjnego, łącząc powszechnie znane modele zdolnościowe, tzw. CMM (z ang.: Capability Management Models) z wytycznymi standardów ISO, jak np. ISO/IEC 15504. Modele te często są pozbawione przykładu zastosowania w praktyce, co stawia pod znakiem zapytania ich walidację (Lacerda i Wangenheim, 2018). Ponadto, ignorują one istotne kryteria i parametry użyteczności inżynierskiej przedmiotowych obiektów i procesów, których dojrzałość powinny rzekomo oceniać i kształtować.

3.2.2 Definicje modeli dojrzałości

Najnowsze definicje modelu dojrzałości stanowią syntezę definicji generycznych, wywodzących się z teoretycznej analizy przedmiotu dojrzałości przedsiębiorstw oraz definicji specyficznych, budowanych w oparciu o zastosowania modelu dojrzałości w wybranym obszarze rynkowym. Choć niektóre z definicji generycznych, jak i specyficznych nawiązują do dojrzałości konkretnych gałęzi przemysłu oraz do rozmaitych aspektów zarządzania danymi, istnieją między nimi fundamentalne różnice strukturalne, semantyczne i techniczne (Fernández-solís, 2008). Ponadto, żadna z istniejących definicji nie adresuje bezpośrednio procesu wdrażania bliźniaka cyfrowego w środowisku przedsiębiorstwa.

W poszukiwaniu definicji RM4DT, tj. modelu gotowości przedsiębiorstwa w zakresie gotowości danych, technologii i dojrzałości zarządzania danymi na potrzeby wdrażania bliźniaka cyfrowego, istniejące definicje modeli dojrzałości podzielono na trzy grupy:

- a) generyczne modele dojrzałości – umożliwiające zastosowanie dla każdego podmiotu, lecz na wysokim poziomie ogólności;
- b) modele dojrzałości skoncentrowane na obszarze rynkowym, jak np. przemysł budowlany, wydobywczy, farmaceutyczny;
- c) modele dojrzałości skoncentrowane na wybranym aspekcie operacyjnym lub procesie, jak np. administracja danych, podejmowanie decyzji kapitałowych.

W każdej z tych grup zdefiniowano zakresy wartościowe dla definiowania modelu RM4DT. Bliższej analizie poddano definicje, spełniające co najmniej jeden z warunków:

- a) wartościowe dla RM4DT elementy generyczne definicji modelu dojrzałości;
- b) odniesienie do zarządzania procesami w przedsiębiorstwach;
- c) odniesienie do zarządzania danymi i/lub bliźniaka cyfrowego.

Zestawienie analizowanych definicji modeli dojrzałości oraz standardów o charakterze modeli przedstawiono w Tabeli 3.1. W kolumnie drugiej pogrubiono elementy definicji, które zostały wykorzystane do ukształtowania definicji modelu gotowości, stosowanej w dysertacji.

Tab. 3.1. Zestawienie definicji modelu dojrzałości

Model dojrzałości lub standard	Definicja modelu dojrzałości	Spełnia warunki	Źródło
Standaryzowana poprawa procesów (z ang.: <i>SPICE</i>)	evolutionary framework for business process improvement and also an assessment tool for organisational maturity	a	Finnemore i Hutchinson, 1999
Zintegrowany model dojrzałości zdolnościowy (z ang.: CMMI) opracowany przez Software Engineering Institute (2006)	Sprawdzony zestaw najlepszych praktyk zorganizowanych wokół możliwości, poprawiających wyniki biznesowe . Zaprojektowany tak, aby był zrozumiały, dostępny, elastyczny i aby integrował się z innymi metodologiami, takimi jak agile .	a, c	Jayanetti, Perera i Waidyasekara, 2022 (2006)
model dojrzałości procesów biznesowych (z ang.: <i>BPMM</i>)	rama działań doskonalących w oparciu o inne modele ; zawiera pięć poziomów dojrzałości i trzydzieści obszarów procesów	a	Curtis, Gardiner i Weber, 2008
Model dojrzałości zdolnościowy (z ang.: CMM)	referencyjny model (procesów) dojrzałych praktyk w określonej dziedzinie , stosowanych w celu doskonalenia i oceny zdolności grupy do realizowania tej dziedziny	a	Brotby, 2009
Model dojrzałości zarządzania portfolio, programami i projektami (z ang.: <i>P3M3</i>) opracowany przez Office of Government Commerce (2010)	Ustrukturyzowany model zawierający poziomy dojrzałości, perspektywy procesów i atrybuty , zapewniające obraz tego, gdzie w danym momencie znajduje się organizacja w zakresie swoich zdolności zarządzania projektami, portfolio, programami w odniesieniu do dowolnego procesu. Ponadto dostarcza wiedzy na temat tego, gdzie organizacja chce być w przyszłości , co stanowi podstawę do opracowania planu doskonalenia i śledzenia postępów.	a, c	Jayanetti, Perera i Waidyasekara, 2022 (2010)
Projekty w kontrolowanych środowiskach (z ang.: <i>PRINCE2</i>)	standard, zapewniający ramy oceny aktualnego stanu zarządzania projektem wg metody PRINCE2, służące ustaleniu planu doskonalenia z mierzalnymi wynikami w oparciu o najlepsze praktyki w danej branży	a	Williams, 2010
Dojrzałość w sektorze usługowym	jeden z elementów składowych nadrzędnego procesu planowania opartego na modelu, stosowanego na wczesnych etapach projektowania systemów produkcyjnych	b	Aurich, Siedler i Sinnwell, 2019

Model dojrzałości Logistyka 4.0	narzędzie służące ocenie poziomu rozwoju przedsiębiorstwa w stronę Logistyki 4.0 w oparciu o poziom wdrożenia narzędzi i technologii informatycznych	b, c	Kosacka-Olejniki i Werner-Lewandowska, 2019
Model dojrzałości w zakresie uczciwych danych (z ang.: <i>FAIR Data Maturity Model</i>)	narzędzie, z którego mogą korzystać różni interesariusze, w tym badacze, administratorzy danych, decydenci i agencje finansujące, w celu uzyskania wglądu w obecną jakość danych , a także w aspekty, które można poprawić w celu zwiększenia potencjału do ponownego wykorzystania danych badawczych .	c	Bahim i in., 2020

Źródło: Opracowanie własne

Z perspektywy zarządzania procesami i zasobami model dojrzałości definiowany jest zwykle jako narzędzie, rama, punkt odniesienia lub zbiór dobrych praktyk, służących ocenie aktualnego stanu zdolności organizacji do realizowania określonych procesów przy użyciu określonych narzędzi oraz zaplanowaniu etapów rozwoju w przedmiotowym zakresie i śledzeniu postępów w oparciu o mierzalne wskaźniki (Jayanetti, Perera i Waidyasekara, 2022).

W przypadku oprogramowania najczęściej opisywanymi i stosowanymi podejściami są modele dojrzałości administrowania danymi DGMM (z ang.: *Data Governance Maturity Model*) oraz zdolnościowe modele dojrzałości CMM (z ang.: *Capability Maturity Model*). Pozwalają one na ocenę aktualnego stanu dojrzałości procesów podmiotu, związanych z administrowaniem danymi, ze szczególnym uwzględnieniem zarządzania zasobami cyfrowymi. Nie odnoszą się one wprost do parametrów jakości czy użyteczności danych, lecz raczej do procesów gromadzenia, porządkowania i przetwarzania danych, a także do relacji między osobami i działaniami zaangażowanymi w te procesy (Handika, Ruldeviyani i Saputra, 2018).

Odmianą grupę modeli dojrzałości stanowią modele administrowania danymi, dedykowane konkretnym obszarom, jak dojrzałość przedsiębiorstw budowlanych, wydobywczych, lotniczych, szpitali, miast czy zielonych organizacji. Przykładem może tu być model dojrzałości administrowania danymi w zielonym IT – GMGIT (z ang.: *governance and management framework for Green IT*). Model został zdefiniowany w celu administrowania danymi w przedsiębiorstwach i innych organizacjach, dążących do bardziej ekologicznego zarządzania zasobami IT, jak i w roli narzędzia, służącego prowadzeniu audytów pod tym samym kątem w innych przedsiębiorstwach (Baldassarre i in., 2019).

3.2.3 Poziomy dojrzałości i gotowości – problematyka ich definiowania

Przegląd literatury wyraźnie wskazuje na trudności przedsiębiorstw w zrozumieniu koncepcji modeli dojrzałości i gotowości z perspektywy organizacyjnej, nawet w przypadku modeli, dedykowanych dla danej branży (Bibby i Dehe, 2018). Przedsiębiorstwa borykają się ze zdefiniowaniem własnych celów strategicznych, a przełożenie ich na parametry modelu stanowi dla nich tym większe wyzwanie. Powoduje to duże trudności na etapie kształtowania stabilnego planu działania oraz zgodnych z planem i modelem działania projektów (Bertenrath i in., 2015). Poziomy dojrzałości i gotowości są odpowiedzią na poważne trudności przedsiębiorstw w ocenie własnego aktualnego stanu transformacji cyfrowej (Anderl i in., 2018).

Poziomy dojrzałości stanowią integralny komponent większości modeli dojrzałości bez względu na ich specjalizację dziedzinową i technologiczną. Jak wskazują badania, poziomy dojrzałości są też najczęściej występującym elementem modeli dojrzałości, pojawiając się w 14 na 15 analizowanych przypadków (Jayanetti, Perera i Waidyasekara, 2022, s. 307). W przeanalizowanych w ramach badania modelach dojrzałości wyodrębniano od czterech do ośmiu poziomów dojrzałości.

Poziom dojrzałości pozwala zawęzić zakres oceny, jakiej podlega przedsiębiorstwo, stosujące model dojrzałości. Poziom dojrzałości zwykle umożliwia jakościowy pomiar parametrów, najważniejszych z perspektywy celów danego przedsiębiorstwa i stosowanego modelu (Bahim i in., 2020).

Stanowiąc przejrzystą skalę oceny dojrzałości przedsiębiorstwa, poziomy dojrzałości ułatwiają korzystanie z modelu, a także wzmacniają komunikowanie celów strategicznych wewnątrz przedsiębiorstwa, jak i do otoczenia biznesowego. Świadome konieczności włączenia pracowników wszystkich szczebli w transformację cyfrową przedsiębiorstwa, podejmują kosztowne projekty uświadamiające, jak „Akademia Przemysłu 4.0”, budowanie stanowisk demonstracyjnych, czy całych ośrodków szkoleniowo testowych poświęconych transformacji cyfrowej. W tych wysiłkach, kluczowe jest zrozumiałe opisanie aktualnych i docelowych poziomów dojrzałości, a także ich graficzne reprezentacje, np. w postaci schodów, diagramów, tabel, czy piramid, w celu ułatwienia zrozumienia celów taktycznych i strategicznych przedsiębiorstwa wśród pracowników (Jain i in., 2021). Wybór dobrze sformułowanego aktualnego i docelowego poziomu dojrzałości przez przedsiębiorstwo pozwala zmniejszyć wątpliwości, dotyczące planowanych zmian i interwencji w obszarach, związanych z planowaną za pomocą modelu dojrzałości transformacją.

Nieco odmienne, zorientowane całkowicie na perspektywę właściciela danych, podejście proponują Eckartz, Hofman i Van Veenstra. Ich model strukturyzuje wątki wg 5-ciu wymiarów, dobieranych w kontekście celów przedsiębiorstwa z uwzględnieniem możliwości wykorzystania otwartych danych (Eckartz, Hofman i Van Veenstra, 2014, s. 262). Model elastycznie uzależniający dobór kryteriów i danych od celów przedsiębiorstwa, agnostyczny względem poziomu dojrzałości gospodarki, może znaleźć zastosowanie również w mniej dojrzałych cyfrowo przedsiębiorstwach. W takim modelu, przedsiębiorstwo najpierw określa konkretny cel biznesowy, jak np. wzrost konkurencyjności na wybranym rynku, wsparcie trafności decyzji w wybranym obszarze, czy realizacja konkretnego scenariusza biznesowego. Następnie przedsiębiorstwo nie digitalizuje całych warstw, klas, czy rodzajów informacji, a skupia się na cyfryzacji wyłącznie tych informacji, jakie są niezbędne do osiągnięcia wcześniej zdefiniowanego celu.

Przypisanie określonego poziomu dojrzałości do aktualnego stanu przedsiębiorstwa podnosi świadomość bieżącej sytuacji samego przedsiębiorstwa, jak i jego pozycji względem konkurencji i rynku. Przypisanie poziomu dojrzałości następuje w oparciu o listę opisów bądź pytań, dotyczących każdego z kryteriów i parametrów dojrzałości. Walidacja istotności wpływu poszczególnych pytań na wybór poziomu dojrzałości jest krytyczna podczas przypisywania poziomu dojrzałości, ponieważ pytania o niewielkim faktycznym wpływie na ocenę dojrzałości mogłyby zawyżać, bądź zaniżać ocenę dojrzałości, zniekształcając wyniki (Domański i in., 2019, s. 1741). Ponieważ przypisanie przedsiębiorstwu poziomu dojrzałości prowadzone jest w oparciu o dane jakościowe, często niepełne bądź z małej próby, zazwyczaj nie jest możliwe podjęcie bezspornej, opartej o matematyczną kalkulację decyzji w tym zakresie. W tej sytuacji konieczne jest zastosowanie metod zmniejszających niepewność w warunkach niekompletnych bądź niepewnych danych (Mierzwiak, 2015), o czym traktują dalsze sekcje niniejszego rozdziału.

3.2.4 Kryteria klasyfikacji poziomów dojrzałości

Podczas przeglądu literatury dotyczącej modeli dojrzałości, wskazujących rozmaite poziomy dojrzałości, zaobserwowano liczne podobieństwa merytoryczne i strukturalne. Zarówno liczba poziomów dojrzałości, jak i kryteria klasyfikacji wykazują podobieństwa.

Porównanie poziomów dojrzałości, stosowanych w modelach, zbliżonych merytorycznie do kontekstu rozprawy, przedstawiono w Tabeli 3.2.

Tab. 3.2. Porównanie poziomów dojrzałości stosowanych w popularnych modelach dojrzałości

Model	Liczba poziomów	Nazwy poziomów	Kryteria / parametry	Zakres oceny	Źródło
HESA dojrzałość danych	5	predykcyjny proaktywny stabilny reaktywny chaotyczny	ludzie i kultura procesy biznesowe aktywności dot. danych technologia	0-4	www.hesa.ac.uk, 2022
Model dojrzałości Przemysł 4.0	4	ekspert doświadczony nowicjusz outsajder	ludzie i kultura świadomość P4.0 strategia łańcuch wartości i procesy technologie inteligentnej produkcji produkty i usługi technologie P4.0	1-5	Jain i in., 2021
Indeks dojrzałości Przemysłu 4.0 Acatech	6	adaptacyjny predykcyjny transparentny dostępny skomunikowane skomputeryzowane	<u>Zasoby:</u> zdolności cyfrowe, struktura komunikacyjna; <u>Systemy informatyczne:</u> przetwarzanie informacji, integracja IT; <u>Struktura organizacyjna:</u> organizacja wewnętrzna, współpraca w sieciach wartości; <u>Kultura:</u> współpraca społeczna, otwartość na zmiany	1-6	Anderl i in., 2018
Zielone IT w oparciu o CMMI	5	optymalizowany zarządzany mierzalnie zdefiniowany zarządzany wstępny	zielone dzięki IT zielone IT, ludzie i kultura zarządzanie	1-4	Baldassarre i in., 2019
Przemysł 4.0	6	topowy ekspert	strategia i organizacja inteligentna fabryka inteligentne działania	1-5	Bibby i Dehe, 2018

		doświadczony przeciętny początkujący outsajder	inteligentne produkty usługi w oparciu o dane pracownicy		
Dojrzałość zarządzania danymi w Internecie rzeczy IoT DQM-PRM	5	innowacyjny przewidywalny stabilny zarządzany podstawowy	dostępność danych wsparcie w zakresie danych poprawa jakości danych zapewniona jakość danych kontrola jakości danych planowanie jakości danych	od 1-3 do 1-6 w zal. od kryterium	Caballero i in., 2022
model dojrzałości procesów biznesowych (z ang.: <i>BPMM</i>)	5	innowacyjny przewidywalny standaryzowany zarządzany wstępny	na każdym poziomie inne kryteria i różna liczba kryteriów (od 0 do 10)	1-5	Curtis i in., 2006

Zródło: opracowanie własne

W przytoczonych przypadkach, liczba poziomów dojrzałości mieści się w przedziale od czterech do sześciu poziomów, a liczba stopni oceny poszczególnych kryteriów nie przekracza pięciu. Każda ze skal oceny poziomów dojrzałości pod różnymi nazwami kwantyfikuje kryteria ludzi i kompetencji, procesów oraz zasobów, w tym danych cyfrowych. Kryteria w zakresie technologii, zarządzania i otoczenia/ekosystemu pojawiają się, lecz nie we wszystkich analizowanych przypadkach. Ponadto, niektóre modele przewidują specyficzne kryteria klasyfikacji poziomów, jak kontrola jakości, wpływ na strategię, czy wpływ na produkty/usługi w przedsiębiorstwie.

Niektóre modele dojrzałości, jak np. ISO/IEC 33020 podzielono na dwa obszary oceny dojrzałości, pierwszą część określającą dojrzałość procesów (z ang.: *governance* lub *management*) i drugą poświęconą zarządzaniu zasobami bądź gotowości (z ang.: *capability*) zasobów, w tym danych, do transformacji cyfrowej (Caballero i in., 2022).

Ciekawe z perspektywy dysertacji, bo dwuetapowe podejście do klasyfikacji poziomów dojrzałości zastosowała agencja HESA (z ang.: *Higher Education Statistics Agency*). Najpierw, w ramach trwającego od 2015 roku programu HEDIIP, zaangażowano 101 instytucji szkolnictwa wyższego, których zadaniem było przeprowadzenie samooceny dojrzałości organizacyjnej do wykorzystywania danych. W następnym kroku, wypracowane w ten sposób

kryteria i narzędzia wykorzystane zostały do uruchomienia w 2022 roku programu „Przyszłość danych” (z ang.: *Data Futures*), w ramach którego uczestniczące jednostki dostarczyły danych spójnych, ustandaryzowanych i dobrze opisanych. W wyniku programów wypracowano model dojrzałości instytucji szkolnictwa wyższego, obejmujący 8 etapów: cele organizacji – zrozumienie danych – ustalenie poziomu aspiracji – ocena aktualnej dojrzałości – rozpoznanie luk – określenie działań zaradczych – opracowanie planu działania – wdrożenie. Na każdym z etapów klasyfikowano uczestniczącą jednostkę do jednego z pięciu możliwych poziomów: predykcyjnego, proaktywnego, stabilnego, reaktywnego, chaotycznego. Ocena każdego z kryteriów na każdym z etapów była prowadzona wg następujących kryteriów: działania, efekty, kultura organizacyjna, praktyki i techniki, technologie, role i odpowiedzialności. Dla każdego z kryteriów opracowano od trzech do sześciu pytań, które następnie nie były oceniane indywidualnie lecz zbiorczo, w drodze przyznania jednej oceny punktowej dla każdego kryterium bez względu na liczbę pytań czy parametrów z nim związanych (www.hesa.ac.uk, 19.08.2022). Podobnie, opracowane w dysertacji kryteria zawierają po kilka parametrów i ocena kryteriów jest zbiorcza, z tą różnicą, że ocena kryterium w dysertacji stanowi uśrednioną wypadkową parametrów, a nie całkowitą liczbę przyznawaną dla całego kryterium, co szczegółowo wyjaśniono w rozdziale czwartym dysertacji.

3.2.5 Działania podnoszące poziom dojrzałości przedsiębiorstwa

Z analizy literatury wynika, że rozmyte, niejasne rekomendacje, bądź ich brak stanowi jeden z najsłabszych aspektów stosowania modeli dojrzałości przez przedsiębiorstwa.

Rekomendacje w postaci zaleceń, odpowiadających na pytanie co i jak należy zrobić, aby ze stanu aktualnego przejść na poziom wyższy niemalże nie istnieją w analizowanych modelach dojrzałości. Najczęściej rekomendacje są zastępowane opisami poziomów dojrzałości i przypisaniem stanów obecnego i oczekiwanego do opisanych poziomów (Cronemyr i Danielsson, 2013). Z jednej strony zrozumiałe jest, że opracowując model dojrzałości, autorzy nie mają wiedzy nt. wewnętrznych procesów analizowanego przedsiębiorstwa. Z drugiej strony oczekiwania przedsiębiorstw wykraczają poza ocenę stanów, do rekomendacji konkretnych działań.

W niektórych modelach dojrzałości pojawiają się opisy działań i interwencji, dotyczących sposobu przejścia z jednego poziomu na kolejny (Crawford, 2021). Jednak duży poziom ogólności tych rekomendacji pozwala twierdzić, że nie wykraczają one poza dość

oczywiste zalecenia w sytuacji podmiotu, planujący transformację. Dla przykładu, model dojrzałości PSC w wyniku przeprowadzonej czasochłonnej analizy określa oczekiwany poziom dojrzałości, a także formułuje zalecenia: „*Obecny skład działu usług powinien zostać powiększony, a jego kompetencje podniesione w zakresie rozwoju usług; dział sprzedaży wymaga nowej wiedzy, umiejętności i zmiany nastawienia do sprzedaży nowych rozwiązań*” (Exner, Zimpfer i Stark, 2017, s. 179). Na tak wysokim poziomie ogólności, rekomendacje wnoszą niewielką wartość dla przedsiębiorstwa. Ponadto, przytoczone zalecenia abstrahują od zdolności inwestycyjnych przedsiębiorstwa, jak i od jego strategicznych celów biznesowych, co czyni zalecenia abstrakcyjnymi. Jedną z możliwości urealnienia rekomendacji byłoby oszacowanie ryzyka niepowodzenia oraz adekwatności rekomendowanych nakładów do oczekiwanych korzyści, czego jednak w analizowanych modelach dojrzałości brakuje.

3.2.6 Poziom adekwatności

Proponując w 1965 roku trzy kryteria oceny poziomu adekwatności dla nauk o języku naturalnym – adekwatność obserwacyjną, opisową i wyjaśniającą - Noam Chomsky podkreślił, że nie należy mylić jego teorii z narzędziem do analizowania problemów gramatyki (Chomsky, 1965, s. 51). Od początku, teoria poziomów adekwatności miała służyć “*projektowaniu generycznych modeli* (Green, 2006, s. 49)” i adresować wyzwania różnych nauk w sytuacjach, gdzie niekompletność, bądź niedoskonałość analizowanych informacji wymusza podjęcie subiektywnej decyzji. Zgodnie z teorią Chomskiego, uzyskując skończone dane wejściowe, operator ludzki zyskuje potencjał generowania nieskończonych kombinacji wynikowych. Jednocześnie, niedoskonałość danych wejściowych, np. na skutek błędów w generowaniu wypowiedzi, nie koniecznie skutkuje niedoskonałością uzyskanej wiedzy (Green, 2006, s. 48-50).

Podobnie, w kontekście zarządzania danymi dojrzałość przedsiębiorstwa można rozpatrywać z jednej strony przez pryzmat doskonałości przetwarzanych danych, a z drugiej przez pryzmat wartości wiedzy, uzyskiwanej w wyniku działania BC. Jednocześnie należy pamiętać, że zachowania modelu symulacyjnego, jak i wyniki prowadzonych symulacji nigdy nie prezentują doskonałego odwzorowania świata rzeczywistego. Należy zatem jeszcze przed przystąpieniem do tworzenia modelu symulacyjnego zdefiniować akceptowalny poziom dokładności odwzorowania. Wymaga to również nakreślenia stref tolerancji dla każdego z

aspektów rzeczywistości, podlegających symulacji i stanowiących parametry oceny modelu i wyników symulacji (Monostori, Pfeiffer, Popovics, 2016).

3.2.7 Definicja modelu gotowości dla potrzeb dysertacji

W dysertacji model gotowości jest rozumiany jako konstrukcja stanów, wymiarów i parametrów gotowości wraz z ich opisami, wzorami i sekwencjami zalecanych czynności, jakie przedsiębiorstwo powinno zastosować w celu optymalizacji nakładów planowanych do poniesienia w związku z wdrożeniem bliźniaka cyfrowego.

Na model gotowości w dysertacji składają się:

- a) model opisowy – objaśnienie celów, korzyści, a także poszczególnych komponentów i procesów modelu gotowości, w tym stany i wymiary gotowości;
- b) model graficzny – wizualne przedstawienie modelu gotowości, w tym sekwencji czynności, jakie przedsiębiorstwo powinno wykonać, aby zastosować model gotowości, a także wizualne przedstawienie wektora zmian, związanych z planowanymi zmianami stanu gotowości przedsiębiorstwa;
- c) model formalny – liczbowo-znakowa konstrukcja, służąca obliczeniu planowanych zmian poszczególnych parametrów gotowości, a także poziomu adekwatności planowanych zmian do oczekiwanych korzyści, jak i efektywności tych zmian w kontekście korzyści i ryzyka niepowodzenia;
- d) model decyzyjny – opis sekwencji czynności, przedstawionych wizualnie na modelu graficznym, jakie przedsiębiorstwo podejmuje, planując wdrożenie bliźniaka cyfrowego.

3.3 Koncepcja gotowości do dojrzałości

Opracowany przez NASA w 1995 roku (Mankins, 1995) model i poziomy gotowości technologicznej (z ang.: *TRL - Technology Readiness Levels*) umożliwiają określenie poziomu gotowości technologii na 9-ciostopniowej skali. Poziomy gotowości technologicznej *TRL* to ważny miernik używany przez agencje rządowe Stanów Zjednoczonych, takie jak NASA i Departament Obrony, który ma na celu ilościowe określenie dojrzałości nowych technologii oraz umożliwienie porównania ich z alternatywnymi rozwiązaniami (Lemmermann i Seablomm, 2012).

Jak wskazywała w 2016 roku NASA, od chwili opracowania modelu TRL, nie podjęto próby określenia w jaki sposób inżynierowie mieliby określać na którym z poziomów znajduje się technologia, która planują wdrożyć (Hirshorn i Jefferies, 2016). Zauważono, że model TRL nie definiuje czym właściwie jest dojrzałość, gotowość, ani nie podaje parametrów, czy kontekstu w jakim powinien być stosowany, co doprowadziło do nadużywania modelu, niekontrolowanego wzrostu kosztów, i wyboru rozwiązań niejednokrotnie mniej dojrzałych niż alternatywne. NASA stwierdza w raporcie, że „*oceny TRL oparte na dobrych intencjach miały na celu wsparcie Departamentu Obrony w nabyciu technologii. Tymczasem w rzeczywistości wprowadziły nowe ryzyko z powodu braku standardów zastosowania TRL (...)*” podczas wdrożenia konkretnego rozwiązania dla danej misji. Dalsze obserwacje w NASA wskazywały, że „*(...)w zależności od przeznaczenia, rozwiązanie uważane za dojrzałe może znajdować się na różnych poziomach gotowości (...)*” (Hirshorn i Jefferies, 2016). W rezultacie, postanowiono opracować metodę oceny gotowości technologii (z ang.: *TRA – Technology Readiness Assessment*), pozwalającą na ocenę dojrzałości technologii w kontekście planowanego wdrożenia oraz na określenie procesu zarządzania wdrożeniem technologii na potrzeby konkretnej misji (Hirshorn i Jefferies, tamże).

Podczas gdy NASA definiuje poziomy gotowości technologii TRL jako „*(...) metodę szacowania dojrzałości technologicznej krytycznych elementów technologicznych programu*” (Hirshorn i Jefferies, 2016), analogiczne wnioski można zaobserwować w literaturze nauk o zarządzaniu. Obok modeli gotowości technologii czy danych, proponowane są modele gotowości do zarządzania wybranymi aspektami wdrażania technologii, np. modele dojrzałości zarządzania danymi (z ang.: *data governance maturity model*). Przykładem takiego modelu jest model dojrzałości w zarządzaniu danymi chmurowymi CDGM (z ang.: *Cloud Data Governance Maturity Model*), którego celem jest zapewnienie wiarygodnego źródła danych, służących podejmowaniu krytycznych decyzji w przedsiębiorstwie (Cheng i in., 2017). Model ten nie tylko określa politykę zarządzania wiedzą i danymi w aspektach bezpieczeństwa, optymalizacji, architektury czy rozwoju, lecz również definiuje poziomy dojrzałości przedsiębiorstwa w zarządzaniu danymi chmurowymi, a także metodykę oceny tejże dojrzałości. W modelu brakuje jednak wskazania na którym z poziomów dojrzałości zarządzania danymi, przedsiębiorstwo jest gotowe do wdrożenia BC.

Odmienne podejście można zaobserwować w przypadku modeli gotowości na innowacje cyfrowe (z ang.: *readiness model for digital innovation*). Modele te definiują wskaźniki liczbowe wszystkich parametrów gotowości do wdrożenia, bądź do wytwarzania innowacji. Dla przykładu Husam i Tugrul opracowali model gotowości, definiując wymiary i

parametry oceny oraz ich ranking w oparciu o skwantyfikowane opinie ekspertów i hierarchiczne modelowanie decyzyjne (z ang.: *Hierarchical Decision Modelling*). Model przetestowano na projektach *big data* w przestrzeni miejskiej. Uzyskano wyniki o obiecującym poziomie wiarygodności (Husam i Tugrul, 2020). Nie wykluczone jest możliwość zastosowania ich w kontekście przedsiębiorstw.

Jednak żaden z tych modeli nie określa gotowości w odniesieniu do docelowego stanu, jaki przedsiębiorstwo musi osiągnąć, aby wdrożenie było korzystne i racjonalne. Modele te wskazują jedynie metody pomiaru zastanej sytuacji w przedsiębiorstwie. Powoduje to, że wysoka wartość koncepcyjna takich modeli nie znajduje empirycznego wykorzystania w praktyce przedsiębiorstw. Planując wdrożenie BC w przedsiębiorstwie, niezbędna jest nie tylko wiedza o bieżącej sytuacji, lecz również prognoza możliwości i ograniczeń w celu minimalizacji ryzyk, w tym ryzyka nieracjonalnego wykorzystania zasobów, niezbędnych na dokonanie zmiany, jaką stanowi wdrożenie BC.

Stąd, w ostatnich latach można zaobserwować powstawanie modeli łączących cechy modeli dojrzałości z poziomami oceny gotowości. W rezultacie, opracowane modele dojrzałości z oceną gotowości (z ang.: *RAMM - Readiness Assessment Maturity Models*) mają stanowić przewodnik dla przedsiębiorstwa, pozwalający nie tylko ocenić obecną gotowość przedsiębiorstwa i wskazać istniejące poziomy dojrzałości, lecz również wskazać proces przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami w oparciu o obecną sytuację (De Carolis i in., 2017). Modele typu RAMM nie koncentrują się na kompleksowej ocenie poziomu dojrzałości przedsiębiorstwa, lecz na jego zdolności do przeprowadzenia określonej zmiany, jak np. przejścia na nowy paradygmat zarządzania (Przemysł 4.0), wdrożenia nowych polityk bezpieczeństwa, czy zastosowania zaawansowanego narzędzia cyfrowego (www.bpm-plus.org/readiness-assessment-maturity-model.htm, 12.12.2022).

W dysertacji zaproponowano model gotowości do wdrożenia BC w oparciu o syntezę trzech z opisanych wyżej podejść i miar. Proponowany model łączy:

- a) poziomy dojrzałości w zarządzaniu danymi
- b) poziomy gotowości danych
- c) poziomy gotowości technologii

Uzyskany w wyniku syntezy model gotowości pozwala:

- a) ocenić bieżący stan przedsiębiorstwa w wymiarach decydujących o racjonalności wdrożenia BC, tj. gotowość danych, gotowość technologii, dojrzałość w zarządzaniu danymi;
- b) zdefiniować stan gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC;

- c) zdefiniować i ocenić stan docelowy przedsiębiorstwa po wdrożeniu BC;
- d) ocenić racjonalność wdrożenia BC w przedsiębiorstwie.

3.4 Przesłanki do budowy autorskiego modelu gotowości

3.4.1 Zarządzanie danymi – jako przesłanka do budowy modelu oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Złe decyzje biznesowe, podejmowane w oparciu o nieprawidłowe funkcjonowanie modeli predykcyjnych, wynikają wprost z nieudolnego zarządzania danymi. Coraz częściej decyzje taktyczne i strategiczne są podejmowane na bazie analizy danych, gromadzonych w silosach, magazynach, czy bazach nieskomunikowanych ze sobą działów przedsiębiorstw. Podczas gdy rosnąca lawinowo ilość danych w przedsiębiorstwie wymaga ustrukturyzowanego zarządzania, nastawionego na cele biznesowe, w praktyce przedsiębiorstwa rozpoczynają transformację kiedy nie mają już innego wyjścia, czyli zbyt późno na racjonalne zaplanowanie zmiany. W rezultacie, wartościowa wiedza o przedsiębiorstwie, klientach, dostawcach i procesach, coraz częściej jest zaburzana przez brak monitorowania odpowiednio ukształtowanych procesów oraz chaotyczne zarządzanie danymi (Nousak, Phelps i Hill, 2001, s. 1).

Ze względu na nietrwały charakter danych, zarówno modele je wykorzystujące są zwykle krótkoterminowe i bardzo zmienne. Cechy te stanowią istotny aspekt zarządzania danymi, czyli procesu nadzwyczaj dynamicznego, wymagającego ciągłego monitorowania stanów zarządzanych obiektów i procesów oraz aktualizowania. Dobrą praktyką jest wykorzystanie mechanizmów stosowanych w zarządzaniu rozwojem oprogramowania, takich jak ciągła integracja, czy iteracyjne testowanie i aktualizacje. Niemniej, te same mechanizmy powinny być ostrożnie wykorzystywane w przypadku bardziej zaawansowanych narzędzi, takich jak BC bądź sztuczna inteligencja (z ang.: *AI - Artificial Intelligence*). Nie zawsze przynoszą one oczekiwane rezultaty, ponieważ systemy BC i AI różnią się strukturalnie od zwykłego oprogramowania (Eren, 2022, s. 3).

Koncepcja wykorzystania BC w zarządzaniu aktywnościami przedsiębiorstwa jest nowa i wprowadza do środowiska akademickiego, jak i biznesowego, liczne wyzwania, dotyczące rozwoju i wdrażania BC, w tym zarządzanie danymi. Środowisko wysokowydajnych przedsiębiorstw dostarcza dodatkowych wyzwań dziedzinowych, związanych z wyjątkowo

dużą liczbą równoległych procesów, ich wysokim tempem, złożonością i małą tolerancją na błędy. Zarządzanie danymi w środowisku przedsiębiorstwa koncentruje się wokół takich czynników, jak skalowalność, wydajność dostępu, spójność i re-używalność danych (Erkoyuncu i in., 2019). Aby zaadresować specyficzne dla BC w przedsiębiorstwach czynniki, w dysertacji konieczne było wyjście poza podstawową definicję zarządzania danymi w rozumieniu zarządzania zasobami, czy grupami obiektów. Skupiono się na wybranych w oparciu o literaturę, coraz częściej stosowanych w przedsiębiorstwach narzędziach i metodach zarządzania danymi, jak modele baz danych, ontologie semantyczne oraz metody monitorowania procesów zarządzanych dynamicznie.

Zarządzanie danymi w kontekście przedsiębiorstwa należy do grupy wielomianowych i niedeterministycznych problemów trudnych (Govil i in., 2016). Do największych wyzwań należy odpowiednie strukturyzowanie i formatowanie danych i atrybutów w celu zapewnienia wydajnego łączenia informacji o bieżących procesach, zasobach, stanach i wydajnościach z procesami wirtualnymi, równoległe realizowanymi w ramach BC.

Najnowsze badania proponują nową koncepcję modelu ontologicznego BC, budowanego w celu podejmowania wyzwań, dotyczących zarządzania danymi w procesach (Erkoyuncu i in., 2020). Model ontologiczny BC budowany jest w oparciu o bazę pojęciową, specjalistyczną dla BC w przedsiębiorstwach. Do budowy modelu BC wykorzystano i przekształcono dziedzinowe pojęcia, informacje i wiedzę, tworząc minimalną strukturę modelu. Dzięki wprowadzeniu rzeczywistych ograniczeń, dotyczących poszczególnych kategorii i pojęć, struktura pozwala zwinnie przeszukiwać, mapować i zarządzać dużymi zbiorami dynamicznych danych. Do walidacji sprawności ontologicznego modelu BC wykorzystano metodę śledzenia ograniczeń CBM (z ang.: *Condition-Based Monitoring*). W rezultacie uzyskano znaczny wzrost dokładności wyników symulacji, spójność semantyczną i spójność relacji między obiektami i procesami, uczestniczącymi w całym cyklu życia produktu, w zakresie objętym przez system BC (Erkoyuncu i in., 2020).

3.4.2 Metody zarządzania danymi

Przedsiębiorstwa praktykują różne metody zarządzania danymi w zależności od celów biznesowych, związanych z przetwarzaniem danych oraz jakie działy są zaangażowane w transformację. Zrozumienie celów biznesowych i identyfikacja aktywów informacyjnych, w tym danych, jakie mogą zostać wykorzystane do osiągnięcia celów biznesowych, stanowi

priorytet w zakresie zarządzania danymi. Szczegółowa analiza istniejących danych na etapie planowania, mogłaby jednak prowadzić do błędnych wniosków, ponieważ zarówno planowanie scenariuszy biznesowych, jak i zarządzanie danymi charakteryzuje istotny stopień niepewności (Alexander, Lyytinen, 2017).

Jednym z pierwszych etapów zarządzania danymi jest ich przygotowanie. Rozważając wdrożenie BC w istniejącym przedsiębiorstwie, zarządzający danymi integruje szereg źródeł danych do zunifikowanej postaci. W heterogenicznym środowisku działającego przedsiębiorstwa każde źródło danych wymaga dedykowanego narzędzia gromadzenia danych (Bruke, Curry i Derguech, 2014, s. 206), ponieważ dane różnią się nie tylko sposobem i zakresem ich opisu i atrybutów, ale również poziomem granulacji, częstotliwością i formatem.

W aspekcie wspierania decyzji finansowych, uwzględniane są m.in. teorie asymetrii informacji, teoria wiodącego czynnika oraz teorie zarządzania ryzykiem. Dzięki zastosowaniu BC lub innych narzędzi transformacji cyfrowej, jak np. Big Data, można zaobserwować optymalizację działania przedsiębiorstwa w zakresach zarządzania budżetem, kapitałem, aktywami i księgowością. Optymalizacje te skutkują znacznymi wzrostami przychodów i nie zawsze wymagają automatyzacji – często optymalizacja zarządzania danymi może być w pierwszym etapie wykonywana manualnie i dopiero po poddaniu walidacji nowych podejść i procesów w działach odpowiedzialnych za finanse, może zostać podjęta decyzja o wdrożeniu BC czy innych narzędzi, usprawniających proces i podnoszących trafność analiz predykcyjnych. W myśl teorii asymetrii informacji, należy zachować równowagę rozwoju narzędzi cyfrowych przedsiębiorstwa z otoczeniem informatycznym innych graczy na rynku, takich jak działające w Internecie przedsiębiorstwa finansowe, konsultingowe czy analityczne, których poziom zarządzania informacjami w znacznym stopniu determinuje zasadność rozwoju adekwatnych narzędzi w przedsiębiorstwie. Uzyskane w rezultacie takiego podejścia zdolność zarządzania danymi i informacjami podnosi trafność decyzji finansowych w aspektach zarządzania zamówieniami, nadzoru i rozliczania produkcji oraz uruchamiania inwestycji kapitałowych (Ren, 2022).

Wśród wyzwań specyficznych dla zarządzania danymi wymienia się także analizę możliwości korzystania z danych. Mianowicie, nawet jeśli źródło powstania danych cyfrowych znajduje się w przedsiębiorstwie, nie jest to jednoznaczne z możliwością swobodnego wykorzystania tychże danych. Dane takie mogą być dla przedsiębiorstwa niedostępne (np. gromadzone i przetwarzane w zamkniętym środowisku urządzenia czy maszyny) lub stanowić cudzą własność, np. własność producenta urządzenia, generującego dane (Golighly i in., 2018).

Jedną z najskuteczniejszych metod zarządzania dużymi zbiorami danych, obok baz danych, jest tworzenie modeli ontologii semantycznych. Model taki opisuje pojęcia, koncepcje i relacje, istotne z perspektywy BC jednorodnym językiem, wykorzystując dziedzinowe pojęcia i zwroty. Dzięki zastosowaniu tego podejścia rozwiązano wiele problemów, wynikających z niejednorodności danych, prowadząc do ich interoperacyjności. Wykorzystywana w tym celu metoda zarządzania danymi, oparta o tworzenie ontologii semantycznej, cały czas jest rozwijana, i wzbogacana o nowe schematy logiczne i pojęciowe. Powszechnie stosowanym elementem tworzenia ontologii jest szablon opisu zasobów RDF (z ang.: *Resource Description Framework*), który zwiększa potencjał ontologii, gdy jej wartości stanowią wspólny schemat. Ontologia wraz z RDF zapewnia formalną ramę dla pojęć, stosowanych w danej dziedzinie wraz z definicją relacji między nimi (Erkoyuncu i in., 2020). Ponadto, ontologia stanowi wspólną płaszczyznę semantyczną dla naukowców, wymieniających się informacjami i wiedzą w danej dziedzinie (Azevedo i in., 2008).

3.4.3 Dojrzałość zarządzania danymi w oparciu o model semantyczny

Dojrzałość zarządzania danymi jest rozumiana jako poziom, na jakim przedsiębiorstwo opracowało i wdrożyło (a) procesy, (b) polityki, (c) praktyki i (d) struktury niezbędne do optymalizacji zbierania, przechowywania, wykorzystywania i rozpowszechniania swoich danych. Zarządzanie danymi w oparciu o model dojrzałości pozwala organizacji wiedzieć, gdzie są dane, w jaki sposób są wykorzystywane, gdzie i kiedy są łączone z innymi danymi oraz jaka jest ich wartość informacyjna dla przedsiębiorstwa. Jednak niewiele organizacji wdraża ramy zarządzania danymi, dostosowane do ich potrzeb. Jedną z głównych przyczyn tej sytuacji jest ignorowanie konsekwentnego dążenia do podniesienia poziomu dojrzałości zarządzania danymi (Bourdeau i in., 2018).

Model dojrzałości można wykorzystać do pomiaru aktualnego poziomu dojrzałości dowolnego aspektu przedsiębiorstwa w sposób, który pozwoli uświadomić pracownikom mocne strony oraz miejsca, wymagające poprawy. Zarządzanie w oparciu o model dojrzałości pozwala opracować rekomendacje działań, prowadzących do podniesienia dojrzałości do oczekiwanego poziomu, jak również ustalić priorytety tych działań (Borbinha i Proenca, 2018).

Ocena dojrzałości może być wykorzystana do pomiaru aktualnego poziomu dojrzałości określonego aspektu organizacji w znaczący sposób, umożliwiając interesariuszom jasne zidentyfikowanie mocnych stron i punktów poprawy oraz odpowiednie ustalenie priorytetów, co należy zrobić, aby osiągnąć wyższy poziom dojrzałości.

Każde przedsiębiorstwo, niezależnie od branży, musi znać odpowiedź na trzy pytania, od których zależy jego przetrwanie:

- a) jakie są cele przedsiębiorstwa?
- b) czy potrafimy monitorować postępy w stronę osiągnięcia celów?
- c) jakie metodyczne kroki powinniśmy podjąć, aby znaleźć się na dobrej drodze?

W kontekście zarządzania danymi, znalezienie odpowiedzi na te pytania wymaga oceny stanu obecnego, określenia stanu docelowego i zarysowania mostu, umożliwiającego przejście pomiędzy obu stanami. Modelem umożliwiającym znalezienie odpowiedzi na te pytania jest model gotowości danych (Cannon i Gupta, 2020, s. 144-146), który w rozprawie został wykorzystany jako jeden z trzech wymiarów gotowości przedsiębiorstwa.

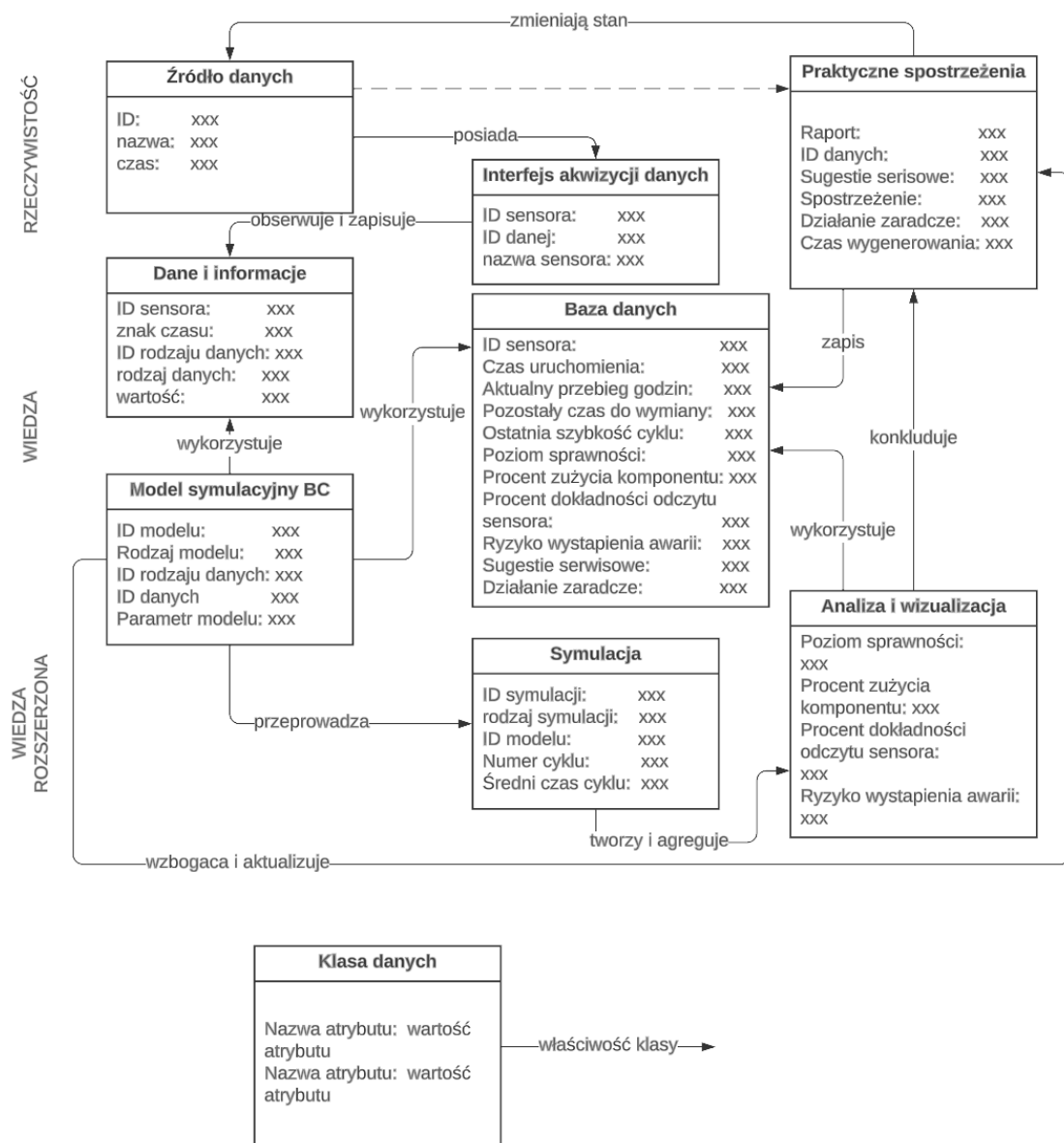
Choć wiele przedsiębiorstw dysponuje dużymi ilościami danych historycznych, zawierających informacje konieczne do prowadzenia zaawansowanych symulacji BC procesowego, optymalizacja procesów w tych przedsiębiorstwach nie jest prowadzona. Przyczyną uśpienia potencjału dostępnych danych i informacji jest strukturalna heterogeniczność danych i ich atrybutów, co w wysokim stopniu utrudnia dynamiczną adaptację procesów w oparciu o symulację (Bao i in., 2020).

W codziennym natłoku zadań, przedsiębiorstwa często ignorują konieczność jasnego sformułowania odpowiedzi na te pytania. Dane schodzą na dalszy plan, są niewłaściwie używane i opisywane. W rezultacie tracą swoją wiarygodność, aktualność, spójność. W następstwie niskiej jakości danych, menadżerowie przechodzą do podejmowania decyzji, polegając na przecuciach i intuicji. Do głosu zaczynają dochodzić kwestie praw do dysponowania danymi i następuje szukanie winnych coraz trudniejszej sytuacji przedsiębiorstwa. W takiej sytuacji przedsiębiorstwa są zmuszone ocenić ekonomiczne i społeczne skutki ignorowania braku konsekwentnego podejścia do zarządzania danymi. Jednym ze sposobów na uporządkowanie tego kluczowego dla sprawności przedsiębiorstwa obszaru jest opracowanie modelu dojrzałości danych w oparciu o rzetelną ocenę ich aktualnego stanu. Dodatkowo, prawidłowa ocena stanu dojrzałości danych może stać się zachętą do podjęcia nowych inwestycji w zarządzanie danymi, przybliżających przedsiębiorstwo do osiągnięcia celów strategicznych (Cannon i Gupta, 2020, s. 149-150).

Jednym ze skutecznie wykorzystywanych w obszarze technologii informacyjnych podejść do optymalizacji łączenia informacji o równoległych złożonych procesach jest tworzenie świata pojęciowo-zależnościowego, zwanego ontologią semantyczną, lub słownikiem kontrolnym. Istnieją przykłady wykorzystania ram i zasad budowania ontologii programistycznych do optymalizacji harmonogramowania wielowątkowych i wieloetapowych

procesów. Wprowadzenie ramy ontologicznej do strategii dynamicznej BC procesowego pozwoliło przyjąć stymulowaną danymi perspektywę usystematyzowanej współpracy zrównoleglonych procesów (Govil i in., 2016), co w przypadku procesowego BC uwalnia potencjał do podniesienia wydajności strategii dynamicznej, a tym samym do zwiększenia dokładności wyników obliczeń BC bez konieczności rezygnacji z adaptacyjnego podejmowania decyzji.

W dysertacji zarysowano przykład teoretyczny ontologii BC w przedsiębiorstwie, jako narzędzia podnoszącego dojrzałość zarządzania danymi. Celem ontologii, przedstawionej na Rys. 3.1 jest zwizualizowanie procesu, obsługiwanego przez BC z perspektywy przepływu danych oraz transformacji dane – informacja – wiedza – wiedza rozszerzona.



Rys. 3.1. Ontologia semantyczna BC w środowisku przedsiębiorstwa – przykład teoretyczny

Źródło: opracowanie własne

Przedstawiona wyżej ontologia jest przykładową strukturą przepływu wiedzy i danych podczas stosowania BC. Ustrukturyzowana w podobny sposób wiedza może stanowić zasób danych wejściowych do modelu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC.

4. ŚRODOWISKO FUNKCJONOWANIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE LITERATUROWE

4.1 Objaśnienie podstawowych pojęć związanych z bliźniakiem cyfrowym

4.1.1 Przesłanki i potrzeba definicji cyfrowego bliźniaka

Równoległe ze wzrostem zainteresowania cyfrowymi bliźniakami wśród praktyków, jak i naukowców, rośnie liczba definicji BC, co zaprezentowano na Rys. 2.2. Obszerna literatura poświęcona różnym rodzajom cyfrowych bliźniaków obejmuje aktualnie setki publikacji, zawierających definicje cyfrowego bliźniaka. Mnogość definicji nie sprzyja jednak jednomyślności środowiska naukowego co do tego czym jest cyfrowy bliźniak i w jaką stronę powinny zmierzać dalsze badania nad relacjami między wirtualnymi a rzeczywistymi obiektami i procesami. W ostatnich latach koncepcja BC ulega ciągłemu rozmywaniu, a nie wyostrowaniu. Rosnąca wszechstronność i daleki zasięg semantyczny BC znacznie poszerzyły obszar analiz, dotyczących bliźniaka cyfrowego. Cyfrowe bliźniaki nie są już uważane za klony rzeczywistości. Zyskały autonomię w wielu aspektach, takich jak przestrzeń, dane i czas, w których syntetyczny bliźniak może być do woli testowany, modyfikowany i doprowadzany do skrajności, zanim zamawiający symulację zaadaptuje podobne zmiany w rzeczywistym otoczeniu.

Niejednoznaczność definicji BC prowadzi do ignorowania, zastępowania lub negacji BC jako narzędzia transformacji cyfrowej. Dla przykładu, w kontekście produkcji energii Mawson i Hughes (Mawson i Hughes, 2019, s. 101) wskazali na szereg narzędzi Przemysłu 4.0, takich jak rzeczywistość rozszerzona, big data, przetwarzanie w chmurze, symulacja, internet rzeczy, symulacja i cyfrowe bliźniaki. Chociaż autorzy podali przykłady praktycznego zastosowania w przypadku innych technologii, nie przedstawili praktycznych przykładów użycia cyfrowych bliźniaków, twierdząc, że cyfrowe bliźniaki są uważane za metodologię pozyskiwania danych lub integracji systemów, a nie narzędzie do podejmowania decyzji wspomaganie faktycznej optymalizacji procesów w przedsiębiorstwie. Jako taki cyfrowy bliźniak został przedstawiony jako potencjalnie przydatny do „*zintegrowanej analizy z otaczającym środowiskiem w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego*” (Mawson i Hughes, 2019, s. 102). Jednak Mawson i Hughes nie znaleźli żadnych badań prezentujących faktyczne wykorzystanie bliźniaka cyfrowego w analizie produkcji energii ani w integracji

rzeczywistych systemów z ich środowiskami lub procesami. Ponadto autorzy nie widzą również opracowań wskazujących na związek wielopoziomowych analiz energetycznych z koncepcjami cyfrowych bliźniaków, wirtualnych zakładów produkcyjnych czy nawet generycznej koncepcji Przemysłu 4.0. Autorzy wskazali, że niewiele zrobiono, aby uwolnić potencjał cyfrowego bliźniaka, zawarty ich zdaniem głównie w zdolności do działania w czasie rzeczywistym i zwiększenia dokładności symulowanych obiektów lub procesów w porównaniu z tradycyjnymi symulacjami przybliżonymi opartymi na modelu, które często wymagają zbyt daleko idących uproszczeń. Mawson i Hughes podsumowali, że narzędzia cyfrowe typu cyfrowy bliźniak są wykorzystywane do planowania procesów i podejmowania decyzji, a nie do szczegółowych analiz czy optymalizacji produkcji energii.

Jedną z najświeższych klasyfikacji, wielowymiarowa taksonomia BC, zaproponowana przez Arbter i in., uwzględnia 233 publikacje, których centrum uwagi stanowi cyfrowy bliźniak. Jednak sami autorzy zwracają uwagę na nieunikniony subiektywizm proponowanej taksonomii, dotyczący głównie zakresów meta-funkcjonalności BC oraz definiowania ram analizowanych obszarów (Arbter i in., 2020, 8).

4.1.2 Pojęcia: cyfrowy bliźniak, cyfrowa nić, cyfrowy cień, model cyfrowy

Pierwsze wzmianki nt. **bliźniaka cyfrowego** odnosiły się do modelu zarządzania cyklem życia produktu (z ang.: *PLM - Product Lifecycle Management*) i obejmowały zarówno system fizyczny, jak i wirtualny wraz z informacjami i danymi z nimi związanymi (Grieves, 2003). Później konstruowane definicje ewoluowały w stronę coraz większego nacisku na przestrzeń danych, łączącą fizyczny obiekt (maszynę, człowieka, miejsce) z jego wirtualną reprezentacją (Azevedo, Silva i Soares, 2021, s. 761). Aktualnie definicje rozszerzają znaczenie BC o odwzorowanie procesów, wprowadzając symulacje jako główne narzędzie łączenia rzeczywistości fizycznej z wirtualnym odpowiednikiem. Dzięki wprowadzeniu narzędzi symulacyjnych, BC zostały uzupełnione o faktycznie realizowane w przestrzeni wirtualnej obserwacje, analizy, wnioski i zadania, takie jak identyfikacja błędów, projektowanie nowych przepływów, czy predykcja awarii (Boschert, Heinrich i Rosen, 2018, s. 209-210). Coraz częściej BC interpretowany jest nie tylko jako zwirtualizowany wycinek rzeczywistości fizycznej, aktualizowany np. za pośrednictwem sensorów, lecz również jako materializacja bytu wirtualnego. Argumentem przemawiającym za możliwością odwrócenia pierwotnej definicji BC jest np. możliwość wysyłania poleceń z systemu wirtualnego do maszyn i

sterowanie nimi, czy też możliwość opracowania modeli lub konstrukcji nowych produktów (Cheng i in., 2018).

W wyniku ustrukturyzowanej analizy pojęcia cyfrowego bliźniaka Arbter i in. podali 4 definicje, w których można odnaleźć wszystkie inne analizowane przez niego podejścia (Arbter i in. 2020). Ujednolicona taksonomia funkcjonalności cyfrowego bliźniaka wskazała szereg cech meta, przeważających w literaturze i zgodnych z przytaczanymi definicjami. Są to:

- a) dwukierunkowy przepływ danych,
- b) BC zbudowany w celu przetwarzania danych,
- c) wysoki stopień powiązania odpowiednika fizycznego z wirtualnym (jeden do jeden),
- d) dokładność odzwierciedlenia bliska identycznej,
- e) posiada interfejs człowiek-maszyna,
- f) dane są aktualizowane w cyklu życia BC,
- g) dane dostarczane do cyfrowego bliźniaka są surowe, nieprzetworzone,
- h) odpowiednik cyfrowy powstał po powstaniu odpowiednika fizycznego.

Do dalszej, szerszej analizy Arbter i in. wskazali zestawienie archetypu cyfrowego bliźniaka z istniejącymi definicjami oraz klasyfikację standardów zarządzania danymi w odniesieniu do cyfrowego bliźniaka. Ponadto, zdaniem autorów, ich opracowanie może posłużyć do „wyprowadzenia zasad dla praktycznego wdrożenia bliźniaków cyfrowych [...] i opracowania modelu w celu ujednoczenia procesu wdrażania Cyfrowego Bliźniaka” (Arbter i in. 2020, s. 8).

W kontekście geomodelowania BC jest przytaczany jako jedna z możliwości na podniesienie bezpieczeństwa i redukcję kosztów prowadzenia licznych eksperymentów, których przeprowadzenie na rzeczywistych obiektach byłoby niemożliwe, niezwykle kosztowne bądź niebezpieczne. W geomodelowaniu przedmiotem odzwierciedlenia cyfrowego są zazwyczaj mapy, tj. obiekty statyczne, zawierające w sobie grupy innych obiektów. Ich modyfikacja w czasie pozwala śledzić zmiany obiektów. Śledzenie historycznych stanów map na przestrzeni czasu pozwala analizować dynamikę zmian, identyfikować korelacje z czynnikami zewnętrznymi oraz podnosi jakość analizy predykcyjnej w odniesieniu do analizowanych obiektów (Drağ, Kamińska i Nowak, 2019, s. 100).

W literaturze w kontekście pojęcia bliźniaka cyfrowego pojawia się szereg pojęć podobnych, jak np.: cyfrowa nieć, cyfrowy cień, czy cyfrowy model. Różnice i podobieństwa pomiędzy tymi pojęciami wymagają wyjaśnienia nie tylko w celu ich lepszego poznania, ale również w celu doprecyzowania i uniknięcia mylnej interpretacji definicji bliźniaka cyfrowego.

Warianty integracji warstw fizycznej z wirtualną bliźniaka cyfrowego i konstruktów, używanych zamiennie z BC przedstawiono w Tabeli nr 4.1.

Tab. 4.1. Porównanie cech i funkcjonalności rodzajów bliźniaka cyfrowego

Cecha / funkcjonalność wariantu	Bliźniak cyfrowy procesowy	Nie cyfrowa	Bliźniak cyfrowy obiektowy	BIM	Cień cyfrowy	Model cyfrowy
Wspiera podejmowanie decyzji finansowych i/lub organizacyjnych	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Odpowiednik cyfrowy powstaje w oparciu o istniejący fizyczny wzorzec w celu jego modyfikacji, poprawienia	Tak	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Umożliwia ‘a gdyby tak’ (z ang.: <i>what-if</i>), tj. koncepcyjne testowanie modyfikacji obiektów	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	Tak
Głównym celem jest wspieranie strategicznych decyzji w oparciu o symulacje predykcyjne	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Aktualizuje dane nie rzadziej niż raz dziennie	Tak	Tak	Nie	Nie	Tak	Nie
Integruje informacje z całego cyklu życia odpowiednika fizycznego od koncepcji do wycofania z eksploatacji	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Stanowi wiarygodne i jedyne źródło danych cyfrowych dot. odpowiednika fizycznego w organizacji	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Wspiera podejmowanie decyzji finansowych i/lub organizacyjnych	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Odpowiednik cyfrowy powstaje w oparciu o istniejący fizyczny wzorzec w celu jego modyfikacji, poprawienia	Tak	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Może działać w architekturze rozproszonej, zdecentralizowanej	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Stanowi ramę komunikacyjną, usprawniającą projektowanie, konstruowanie i produkcję	Nie	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Zawiera elementy, które nie posiadają odzwierciedlenia w rzeczywistości fizycznej	Nie	Tak	Nie	Tak	Nie	Nie

Cecha / funkcjonalność wariantu	Bliźniak cyfrowy procesowy	Nić cyfrowa	Bliźniak cyfrowy obiektowy	BIM	Cień cyfrowy	Model cyfrowy
Odpowiednik wirtualny może służyć jako moduł sterujący obiektem fizycznym	Nie	Nie	Tak	Nie	Nie	Nie
Głównym celem jest prowadzenie eksperymentów w kontrolowanym środowisku	Nie	Nie	Tak	Nie	Nie	Nie

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.1. stanowi zestawienie i porównanie podstawowych podobieństw i różnic pomiędzy popularnymi rodzajami systemów wirtualnych, prezentowanych w literaturze jako BC. W zestawieniu nie zawarto wyczerpującej listy cech i funkcjonalności analizowanych systemów, lecz zbudowano listę wystarczającą, aby rozróżnić poszczególne rodzaje systemów i skupić się w dalszych badaniach na konkretnych aspektach ich działania, wskazanych w pierwszej kolumnie Tabeli 4.1.

Cyfrowa nić (z ang.: *Digital Thread*) jest pojęciem używanym w rozumieniu dwuznacznym i nierzadko zamiennie z pojęciem cyfrowego bliźniaka. Choć niejednokrotnie pojawia się w literaturze w rozumieniu odróżniającym bliźniaka cyfrowego od cyfrowej nici, to przeciwstawność ta jest uzasadniona tylko przy ograniczonej definicji bliźniaka cyfrowego, jako statycznego odwzorowania w rzeczywistości wirtualnej wybranego wycinka rzeczywistości fizycznej. Pierwsze wzmianki dot. cyfrowej nici pojawiły się w 2013 roku w raporcie Global Horizons, opracowanym przez zespół naukowców Sił Powietrznych Stanów Zjednoczonych (z ang. *US Air Force*). W tym pierwotnym użyciu cyfrowa nić rozumiana jest jako jeden ze zwinnych procesów (obok m.in. prac badawczo rozwojowych), przyspieszających pozyskiwanie nowej wiedzy. Termin Cyfrowa nić jest stosowany w raporcie zamiennie z cyfrowym bliźniakiem i rozumiana jako narzędzie mogące zmienić zasady gry, skracając czas rozwoju nowych technologii o 25%. Cyfrowa nić miała być surogatem, łączącym wiedzę i technologie z różnych dziedzin i dostarczającym rozwiązań w postaci cyfrowych prototypów „zanim wygnie się stal”, czyli przed przystąpieniem do produkcji nowego modelu samolotu. Ma też stanowić główne źródło wiedzy dla innych systemów na przestrzeni całego cyklu ich życia (Donley i in., 2013, s. 19). Cechą odróżniająca nić cyfrową od bliźniaka cyfrowego jest stanowienie ramy komunikacyjnej dla procesów projektowania, konstruowania i wytwarzania nowych produktów (Singh, Willcox, 2018, s. 1). Żadna z analizowanych definicji nie wskazuje na to, aby nić cyfrowa miała powstać jako odzwierciedlenie rzeczywistości fizycznej w celu jej

modyfikacji, co potencjalnie może stanowić główny element odróżniający cyfrowe nici od bliźniaków.

Cień cyfrowy (z ang.: *digital shadow*) stanowi cyfrowe odwzorowanie obiektu fizycznego, w którym przepływ danych odbywa się tylko w jedną stronę z obiektu fizycznego do wirtualnego. Zmiana w obiekcie fizycznym jest odzwierciedlana w obiekcie wirtualnym. Jednak zmiana w obiekcie wirtualnym nie skutkuje zmianą w obiekcie fizycznym (Barlow i in., 2020, s. 8). W kontekście przedsiębiorstw fakt niewielkich rozmiarów cienia cyfrowego może stanowić niewątpliwy atut. Przetwarzanie małych rozmiarów cienia pozwala odblokować przepustowość sieci, zmniejsza zapotrzebowanie obliczeniowe i zwiększa możliwości tzw. przetwarzania na granicy (z ang.: *edge-computing*), podnosząc dynamikę oraz odporność systemu (Liebenberg, Jarke, 2020).

W odróżnieniu od cyfrowej nici i cyfrowego cienia, **model cyfrowy** nie jest aktualizowany automatycznie. Podobnie jak cień, model stanowi odzwierciedlenie fizycznie istniejącego, bądź planowanego obiektu, ale wszystkie dane na jego temat wprowadzane są manualnie. Nie zachodzi więc zautomatyzowany przepływ danych pomiędzy obiektem fizycznym a jego wirtualnym odpowiednikiem. Model cyfrowy może być modelem symulacyjnym określonego wycinka przedsiębiorstwa, modelem matematycznym nowego produktu lub elementu stanowiska roboczego, który nie wykorzystuje żadnych narzędzi automatycznej integracji danych. W rezultacie, zmiana w obiekcie fizycznym nie powoduje zmiany w obiekcie wirtualnym ani na odwrót. Dane w modelu cyfrowym mogą być aktualizowane w odpowiedzi na zmiany obiektu fizycznego, jednak modyfikacji tych dokonuje się manualnie (Henjes i in., 2018, s. 1017).

4.1.3 Definicja pojęcia cyfrowy bliźniak przyjęta w dysertacji

W dysertacji przyjęto autorską definicję pojęcia cyfrowy bliźniak, która stanowi wypadkową definicji, przeanalizowanych w trakcie badania literatury. Pojęcie bliźniaka cyfrowego zdefiniowano jako wirtualną reprezentację systemu fizycznego, tj. środowiska, procesu, obiektu wraz z jego elementami, cechami i funkcjonalnościami, których poziom wierności odzwierciedlenia umożliwia symulację i ocenę alternatywnych scenariuszy przyszłości bez straty jakościowej symulowanych zdarzeń w porównaniu z rzeczywistymi zdarzeniami w zakresie kluczowych dla decydenta parametrów.

Ponadto, istnieją pewne parametry systemu wirtualnego, których wartości stanowią kryteria, pozwalające zakwalifikować system jako BC, co przedstawiono w Tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Kryteria kwalifikacji systemu jako bliźniaka cyfrowego

Parametr oceny - czy system jest BC?	Parametry wzorcowe – system jest BC	Parametry dopuszczalne – system jest BC	Parametry niedopuszczalne – system NIE jest BC
Przepływ danych	dwukierunkowy	brak	jednokierunkowy
Główny cel zbudowania	Przetwarzanie danych w celu wygenerowania nowej wiedzy	Transmisja danych	Gromadzenie danych
Stopień powiązania odpowiedników fizycznego z wirtualnym	wysoki - jeden system wirtualny odzwierciedla jeden system fizyczny	Średni - jeden system wirtualny odzwierciedla więcej niż jeden system fizyczny	Niski - do odzwierciedlenia jednego systemu fizycznego potrzeba kilku systemów wirtualnych
dokładność odzwierciedlenia	Odpowiednik wirtualny identyczny z fizycznym	Odpowiednik wirtualny pozbawiony krytycznych braków i błędów	Odpowiednik wirtualny posiada krytyczne braki i/lub błędy
Interfejsy	posiada interfejs/y człowiek-maszyna (H2M)	Posiada interfejs maszyna-maszyna (M2M)	Nie posiada interfejsu M2M ani H2M
Aktualizowanie danych w cyklu życia BC	Wybrane kategorie danych są aktualizowane w czasie rzeczywistym	Istnieje możliwość regularnego aktualizowania danych	Brak możliwości aktualizowania danych
Atrybuty danych dostarczanych do cyfrowego bliźniaka	Surowe dane trafiają bezpośrednio do BC	Surowe dane trafiają do BC po przetworzeniu	System wirtualny nie przetwarza danych surowych ani przetworzonych
Czas powstania odpowiednika wirtualnego względem fizycznego	odpowiednik wirtualny powstał po powstaniu odpowiednika fizycznego	odpowiednik wirtualny powstał przed lub równoległe z powstaniem odpowiednika fizycznego	n/d

Źródło: opracowanie własne

Nie spełnienie dowolnego z parametrów jest wystarczające, aby uznać, że system wirtualny nie jest cyfrowym bliźniakiem.

4.1.4 Budowa bliźniaka cyfrowego - podejście obiektowe i procesowe

Istota zależności między podejściami obiektowym i procesowym tkwi w tym, że wszystkie istniejące obiekty (ciała stałe) są zagnieżdżone w procesach, w których stanowią tymczasowe wiązki sił, wytwarzanych przez procesy, które pozostają niezakończone i otwarte.

Tradycja podziału na podejście procesowe i obiektowe jest zakorzeniona w klasycznej filozofii greckiej, skąd wyrosła dominacja podejścia obiektowego, wzmacniana później przez wpływy pozytywizmu. Doktryna E. Durkheim *les faits sociaux ne sont pas des choses* (z franc.: zjawiska społeczne nie są rzeczami) była w połowie XX w. podważana przez Monnerot (Monnerot, 1946). Jednak obserwacje Monnerot nie wywarły przeważającego wpływu, pozostawiając większość nauk społecznych głównego nurtu w silnym związku z podejściem obiektywnym (Paquet, 2009, s. 18).

Przełożenie powyższych podejść na kontekst gotowości przedsiębiorstw wymaga uwzględnienia aspektów zarządzania przedsiębiorstwem oraz danymi. W ujęciu nauk społecznych podejście procesowe stanowi ogólną strategię do opisywania i wyjaśniania rzeczywistości. Takie rozumienie podejścia procesowego stanowi punkt odniesienia dla analizowanego w dysertacji zarządzania danymi dla celów wdrożenia BC, gdzie ogólny opis rzeczywistości zostaje wzbogacony o szereg meta-cech, jak np. zmienność w czasie czy odniesienie danych, opisujących obiekty do parametrów zarządzanych procesów.

BC w dowolnym przedsiębiorstwie może być wdrażany zarówno w podejściu obiektywnym, jak i procesowym. Wybór podejścia jest zależny przede wszystkim od aspiracji w zakresie dojrzałości cyfrowej i ich adekwatności względem oczekiwanych efektów, wartości.

Przykładem obiektywnego podejścia do tworzenia BC jest wykorzystanie go w inżynierii lądowej do celów zbliżonych do systemów informacji budynkowej typu BIM (z ang.: *Building Information Systems*) oraz do systemów człowiek-komputer CPS (z ang.: *Cyber-Physical Systems*). W tym podejściu instancja wirtualna BC może posłużyć jako moduł sterujący obiektem fizycznym. Każda zmiana w obiekcie wirtualnym powoduje zmianę w obiekcie fizycznym i na odwrót. W tym podejściu BC obiektywny, podobnie jak BIM, zawiera model cyfrowy oraz cień cyfrowy, które stanowią elementy wirtualnej instancji BC. W odróżnieniu od BIM, BC powstaje i jest aktualizowany w oparciu o swój fizyczny odpowiednik. Podczas gdy BIM może przedstawiać elementy nie istniejące w rzeczywistości, BC odzwierciedla stany rzeczywiście istniejącego obiektu.

W kontekście przestrzeni przedsiębiorstwa, istniejące technologie 3D, skanowania i sensoryczne w szybkim tempie podnoszą dokładność odzwierciedlenia rzeczywistości i jakość obiektywnego BC. Coraz łatwiejsze staje się gromadzenie danych przestrzennych i osadzanie w nich obiektów wraz z danymi dot. ich cech, zdarzeń i zachowań. Najbardziej popularnym formatem danych o obiektach przestrzennych jest tworzenie chmur punktów, np. za pomocą skanerów laserowych LiDAR czy LiDAR 3D. Dodatkowych informacji przestrzennych i geometrycznych dostarczają kamery statycznie rozmieszczone w halach produkcyjnych, bądź

na urządzeniach mobilnych, typu AGV czy AMR. Dane geometryczne obiektowego BC mogą być uzupełniane o dane sensoryczne czy to w postaci samodzielnych zbiorów danych, czy atrybutów lub metadanych plików geometrycznych. Są to najczęściej dane o rodzaju maszyny, kolorze, czasie wykonanej czynności lub liczbie cykli w czasie, temperaturze, materiale, wadze, ciśnieniu, częstotliwości drgań, przepustowości, cenie, zużyciu energii, emisji gazów, dane producenta, wpływie na środowisko, komentarze operatorów, błędach, czasie serwisu (Broyd i in., 2021, s.). Niezmiennie największe wyzwanie w wytworzeniu skutecznego BC stanowi znalezienie kompromisu, równowagi między ilością i dokładnością przetwarzanych danych a wydajnością BC, którego granice przesuwane są dzięki coraz zwinniejszym algorytmom oraz dzięki nowym technologiom obliczeniowym, jak np. komputer kwantowy.

Podjęcie procesowe do wdrażania BC ma umożliwić monitorowanie i zarządzanie procesami, w których rozmieszczone są obiekty. Jest w tym rozumieniu podejściem, wymagającym narzędzi bardziej złożonych funkcjonalnie i logicznie niż podejście obiektowe. Poziom złożoności nie jest jednak jedynym czynnikiem, determinującym wielkość nakładów, niezbędnych na wdrożenie i jego zasadność. Więcej czynników wraz z propozycją ich oceny i kształtowania wymieniono w rozdziale czwartym dysertacji.

W kontekście dojrzałości zarządzania danymi, podejście procesowe do BC utożsamiane jest z zarządzaniem informacją w odniesieniu do przepływu materiałów. W podejściu procesowym głównym celem BC jest optymalizacja procesów, a nie możliwość konfiguracji, dekompozycji i re-aranżacji obiektów. Algorytmy stosowane w modelach symulacyjnych podejścia procesowego są skoncentrowane na zbalansowaniu liczby i złożoności przetwarzanych procesów względem wiarygodności i trafności uzyskiwanej wiedzy. Szczególnie w symulacjach predykcyjnych, każde nowe źródło danych, czynnik, parametr, wielokrotnie zwiększa liczbę przetwarzanych w ramach symulacji procesów.

Na złożoność symulacji BC w podejściu procesowym kluczowy wpływ ma ciągłość symulowanych procesów, określana przez strategię tzw. dyskretną, lub ciągłą. Strategia dyskretna symulacji DES (z ang.: *Discrete Event Simulation*) jest dobrze zbadana i ugruntowana w praktyce przemysłowej (Ding i in., 2021). Jest to proces kodowania zachowania złożonego systemu jako uporządkowanej sekwencji dobrze zdefiniowanych zdarzeń. Każde zdarzenie występuje w określonym momencie i oznacza zmianę stanu w systemie (Pawlewski i Olszewski, 2021). Aktualnie, strategię tę wykorzystuje się powszechnie do symulowania odrębnych zdarzeń lub ich ciągów w analizie rynków finansowych. Jednak coraz większą popularnością strategia ta cieszy się też w kontekście zarządzania zasobami i procesami w przemyśle (Kiran, 2019).

Stąd, planowane do uzyskania w ramach wdrożenia BC wartości wymagają określenia podejścia obiektowego bądź procesowego. Cechy BC, pozwalające określić dominujący charakter BC, przedstawiono w Tabeli 4.3. Od wyboru dominującego charakteru BC zależy postać wdrażanego narzędzia, stosowanych technologii, formatów, ilości i rodzaju danych, wielkości mocy obliczeniowych, a także strategia i złożoność planowanych do wykonania obliczeń.

Tab. 4.3. Cechy i funkcjonalności BC w podejściu obiektowym i procesowym

Cecha Funkcjonalność	BC Obiektowy	BC Procesowy
Przedmiot odwzorowania	dominuje warstwa fizyczna; koncentracja na zasobach, obiektach, lub grupach obiektów	dominuje warstwa abstrakcyjna; koncentracja na procesie, bądź grupach procesów
Wymiar czasu	koncentracja na odwzorowaniu stanu w określonym punkcie w czasie	koncentracja na odwzorowaniu operacji jako ciągłych procesów wraz ze zmianami następującymi w czasie
Rozszerzona wiedza	Nie powstaje	Powstaje
Transformacja dane – informacje – wiedza	nie stanowi istotnego przedmiotu działania BC	stanowi istotny przedmiot działania BC
Dynamika przedmiotu odwzorowania	statyczny	dynamiczny
Dominujący cel	Projektowanie / modyfikacja / re-konfiguracja obiektów/grup obiektów, dekompozycja, aranżacja obiektu, fotorealistyka, 3D	Wspieranie decyzji dot. planowanego działania przedmiotu odwzorowania; zarządzanie procesami, w których zagnieżdżone są obiekty / grupy obiektów
Dominujący tryb akwizycji danych	Manualna	Automatyczna
Częstotliwość akwizycji i aktualizacji danych	Dowolna lub brak	regularna w czasie dążącym do rzeczywistego
Dominujące klasy oprogramowania	MES, CAD, CAD 3D, GIS	CFD, ERP
Dominujące obszary stosowanych technologii	VR, AR, kamera/aparat fotograficzny, skaner laserowy LiDAR, CPS, BIM, druk 3D, HPC, farma renderująca, GPU, UAV	IoT, Big Data, komputer kwantowy, przetwarzanie chmurowe, sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe,
Dominujące zastosowanie HPC	farmy renderujące	wielowątkowe symulacje obliczeniowe; obliczenia heurystyczne
Dominujące obszary zastosowań w przedsiębiorstwie produkcyjnym	projektowanie produktów, re-konfiguracja linii produkcyjnej, projektowanie nowych hal, re-aranżacja rozmieszczenia stanowisk roboczych, optymalizacja zużycia energii na wybranych stanowiskach/maszynach, symulatory/trenażery stanowisk pracy / użytkowania produktu,	planowanie i kontrola produkcji, intralogistyka, optymalizacja produkcji, optymalizacja przepływu materiałów, projektowanie nowych procesów, predykcja awarii, predykcja efektów modyfikacji w procesach przedsiębiorstwa

Zródło: opracowanie własne

BC obiektywne i procesowe przybliżają przedsiębiorstwa do uzyskania niektórych wartości, jakie kierują rewolucją Przemysłu 4.0. Wdrożenie BC procesowego przybliży przedsiębiorstwo do osiągnięcia interoperacyjności i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. Natomiast BC obiektywne, bazujący w dużym stopniu na zaawansowanych technologiach wizyjnych i 3D, podnosi dostępność i jakość wirtualizacji fizycznych obiektów do postaci cyfrowej, coraz częściej w jakości fotorealistycznej bądź wyższej. Te same cechy BC pozwalają przybliżyć klientowi, a czasami nawet zaangażować klienta w proces projektowania, konfiguracji, czy aranżacji produktów (np. mebli, samochodów, jachtów, wyposażenia hali produkcyjnej), co stanowi ważny krok w stronę personalizacji lub masowej kustomizacji produkcji. Obok podejść obiektywnych i procesowych, w literaturze obserwowane jest podejście wizjonerskie, ściśle związane z obiektywnym i procesowym, jednak bardziej skoncentrowane na wizji i potrzebach rozwoju BC niż na odniesieniu do praktyki zarządczej (Kosacka-Olejnik i in., 2021). Podejście wizjonerskie jest jednocześnie silnie powiązane z zastosowaniami BC w praktyce przedsiębiorstw. W obserwowanych zastosowaniach dominuje podejście hybrydowe, łączące elementy podejść procesowego i obiektywnego. W takich przypadkach wybór podejścia dyktowany jest tym, jakie cechy i cele dominują w danym przypadku.

Zastosowanie podejścia procesowego obejmuje różne strategie równoważenia używanych zasobów obliczeniowych względem jakości i szybkości uzyskiwania wyników, spośród których najbardziej wyraźnie można odróżnić strategię dynamiczną, wymagającą ciągłej łączności z Internetem (z ang.: *on-line*) od statycznej, nie wymagającej łączności z Internetem (z ang.: *off-line*). Pierwsza ze strategii, strategia dynamiczna *on-line*, jest bardzo zasobochłonna. Na dużą ilość obliczeń wpływają głównie nieprzewidziane zachowania robotów i maszyn, niecykliczny charakter działań komponentów systemu produkcji, wysoka złożoność monitorowanych procesów, utrudniająca ich śledzenie i symulowanie nawet przy użyciu obliczeń heurystycznych. Tymczasem strategia statyczna *off-line* procesowego BC wymaga znacznie mniej zasobów obliczeniowych. Obliczenia, symulacje w strategii statycznej wykonywane są z wyprzedzeniem w oparciu o wcześniej wytyczone cele i wymagania. Operacje poszczególnych elementów linii produkcyjnej wykonywane są cyklicznie, tzn. operatorzy maszynowi, ludzcy i roboty wykonują identyczne cykle działań. Aktualnie, wydajność strategii statycznej jest wyższa niż dynamicznej, pomimo większej dokładności strategii dynamicznej. Wynika to głównie z mniejszej złożoności skończonej liczby cykli niż względem nieskończonej liczby kombinacji procesów niecyklicznych, mniejszej ilości na

bieżąco monitorowanych i aktualizowanych procesów, większej przepustowości oraz bardziej stabilnego (okresowego) wzorca czasu (Hu i in., 2020).

Oba analizowane w niniejszym podrozdziale podejścia podnoszą poziom autonomii funkcjonowania inteligentnych systemów w przedsiębiorstwach, co przede wszystkim obniża ryzyko podejmowania niekorzystnych decyzji inwestycyjnych. Z perspektywy zarządzania przedsiębiorstwem częściej wykorzystywanym podejściem jest podejście procesowe, bądź hybrydowe, łączące cechy i funkcjonalności obu omawianych w niniejszej sekcji podejść. Wynika to z faktu, że przedmiot analiz BC w przedsiębiorstwie należy do grupy problemów trudnych, wielomianowych i niedeterministycznych (Govil i in., 2016), dla których cechy BC procesowego stanowią niezbędne elementy środowiska prowadzenia symulacji.

4.1.5 Obszary zastosowań bliźniaków cyfrowych

Rozwój bliźniaków cyfrowych odbywa się równolegle na wielu płaszczyznach życia i gospodarki oraz obejmuje współpracę interdyscyplinarną nauk technicznych z naukami o zarządzaniu, naukami medycznymi i innymi. Chociaż udostępnianie danych jest popularne w kontekście medycznym, inteligentnych miast, czy zarządzania infrastrukturami komunikacyjnymi, niewiele dobrych praktyk i niewiele badań poświęcono zarządzaniu danymi przez przedsiębiorstwo. Dlatego przy wdrażaniu cyfrowych bliźniaków przedsiębiorstwa albo uciekają się do pozaprzemysłowych metod i narzędzi udostępniania danych, albo tworzą je od podstaw. Jednak bez ustandaryzowanego, powtarzalnego podejścia do udostępniania danych ryzyko inwestycyjne przedsiębiorstw jest trudne do określenia. W związku z tym, dopóki przedsiębiorstwa nie mogą dokładnie ocenić zwrotu z inwestycji w cyfrowe bliźniaki, ten obszar współpracy między nauką a przemysłem pozostaje częścią projektów badawczo-rozwojowych finansowanych ze środków publicznych, a nie integralnym elementem i naturalnym kosztem prowadzenia biznesu. Niemniej interdyscyplinarny charakter badań nad modelami zarządzania danymi i narzędziami transformacji cyfrowej oraz szerokie spektrum potencjalnych zastosowań wypracowywanych komponentów, skłaniają do poszukiwania wzorców i referencji wokół obszarów zastosowań BC, w tym również poza obszarem zarządzania przedsiębiorstwem i poza naukami technicznymi.

Najczęściej analizowanymi w literaturze obszarami zastosowań BC są zdrowie, inteligentne miasto i przemysł w podziale odpowiednio 15%, 19% i 66% (Barlow i in., 2020). Podział ten ignoruje przypadki BC spoza tych trzech obszarów. W każdym z tych obszarów

można zaobserwować dalszy podział na podobszary. Choć każdy z analizowanych w tych obszarach systemów wirtualnych nazywany jest bliźniakiem cyfrowym, to różnią się one zarówno złożonością, jak i wielu cechami i funkcjami. Z tego powodu analizy przeglądowe oprócz deklaracji BC, wskazują jaki rodzaj BC jest reprezentowany oraz jakich technologii użyto. Najczęściej można zaobserwować podział na cyfrowe modele, cienie, nici i bliźniaki, co bliżej wyjaśniono we wcześniejszej części niniejszego rozdziału (Barlow i in., tamże, s. 8).

W nowoczesnej medycynie, opartej w większym stopniu na prognozowaniu i zapobieganiu schorzeniom niż na ich leczeniu, proces optymalizacji spójności AO (z ang.: *Alignment Optimization*), wykorzystywany w symulacjach działania nowych leków, został zainicjowany przez nauki o zarządzaniu, z których wyrosła koncepcja procesu współtworzenia wiedzy równoległe przez wielu uczestników (z ang.: *crowd-sourcing*). Dopiero późniejsze zestawienie tego procesu z teorią gier i tzw. punktem Schellinga oraz z technologiami symulacyjnymi pozwoliło na zastosowanie technologii w opracowywaniu i produkcji leków (Henney, Morley-Fletcher i Viceconti, 2016, s. 40). Aktualne przedsięwzięcia europejskich naukowców zmierzają w stronę analizowania ludzkiego organizmu jako całości. Po raz pierwszy w historii ramy technologiczne dają tak duże możliwości współdzielenia danych między dyscyplinami medycyny, instytucjami i organizacjami w celu tworzenia zaawansowanych modeli symulacyjnych ludzkiego organizmu. Modele te pozwalają na integrację cech mechanicznych, biologicznych, chemicznych i genetycznych organizmu. Inicjatywa VPH (z ang.: *Virtual Physiological Human*) zapoczątkowała łączenie heterogenicznych źródeł danych medycznych, umożliwiając modelowanie niemal wszystkich układów anatomicznych (Geris, Van Sint, 2019).

Artykuły dotyczące BC w obszarze inteligentnych miast stanowią bardziej wizję zakresów wykorzystania BC niż opisy przypadków rzeczywistego użycia narzędzi. Prezentowane w publikacjach podobszary to m.in. zarządzanie odnawialną energią (Ebrahimi, 2019), utrzymanie zwierzyny, czy sterowanie ruchem i transportem miejskim (Wu, 2022). Jednak najbardziej rozbudowana wizje adresują utworzenie wielkoskalowego bliźniaka i połączenie wszystkich obszarów aktywności miasta w jeden system (Lu i in., 2020). Ta wizja zakłada połączenie infrastruktury obliczeniowej z lokalnymi infrastrukturami miasta, miejskimi sensorami i modelami 3D. Wg tej wizji analizy danych, gromadzonych z rozmaitych obszarów aktywności miasta stanowią furtkę do niemal bezbłędnego przewidywania zmian i planowania rozwoju miast w wymiarach architektury, transportu, hydrologii, usług komunalnych, czy zarządzania zielenią miejską. Powstające BC miejskie już wskazują, że ten kierunek jest nieunikniony oraz że podnosi złożoność interakcji na płaszczyźnie transmisji

danych informacji pomiędzy procesami, obiektami i rzeczywistościami fizyczną a wirtualną (Barlow, tamże). Niemniej umiejętne wykorzystanie przez inteligentne miasta narzędzi rozwijanych dla przedsiębiorstw pozwala z optymizmem oczekiwać dynamicznego wzrostu wykorzystania BC przez miasta (Barlow, tamże, s. 16-17). Nie sposób uniknąć analogii BC miejskich z BC w obszarze zdrowia, które „podobnie jak systemy miejskie, rozwijając odrębne układy anatomiczne i molekularne ludzkiego ciała, zmierzają do holistycznego połączenia komponentów w zaawansowany cyfrowy model człowieka.

W obszarze zdrowia można wyodrębnić trzy podobszary bliźniaków cyfrowych – bliźniaki szpitalne, bliźniaki organów ludzkich oraz bliźniaki farmaceutyczne (Chen i in., 2020). Pierwsze z nich, bliźniaki szpitalne strukturalnie przypominają intralogistyczne bliźniaki przemysłowe. Są one skoncentrowane na optymalizacji scenariuszy przepływu obiektów w procesach realizowanych na terenie szpitala. Z ich pomocą na modelach szpitali symulowane są trasy ewakuacyjne, dostawy leków i urządzeń medycznych, czy trasy dotarcia pielęgniarek do łóżek pacjentów (Karakra i in., 2019, s. 1-4). Zadaniem drugiego podobszaru zdrowia – bliźniaków organów ludzkich – jest symulowanie zachowania organów w odpowiedzi na planowane scenariusze terapeutyczne, w tym terapie mechaniczne, np. potencjalne zachowanie stawu kolanowego pod obciążeniem X kN, czy też reakcja i zachowanie układu oddechowego, w tym płuc, w odpowiedzi na intensywny wysiłek fizyczny po podaniu leku Y (Erol i in., 2020, s. 1-7). Wirtualna fizjologia człowieka *VPH* tworzy ramę metodologiczno-technologiczną do wspólnego prowadzenia badań nad poszczególnymi układami organizmu ludzkiego i ich współzależnościami. Trzecim podobszarem zdrowia są symulacje farmaceutyczne, głównie w zakresie procesów białkowych (Ostasevicius, 2022.). Symulacje dynamiki molekularnej prowadzone są w oparciu o dokładne odwzorowanie struktury przestrzennej białka wraz z jego otoczeniem i sekwencją aminokwasową. Dokładne modele białek o określonych funkcjach w organizmie poddawane są reakcji z projektowanymi lekami. W ten sposób prowadzona jest predykcja modyfikacji funkcjonalności białek w odpowiedzi na wybrany skład i strukturę leku (Błaszczak, 2015, s. 13).

Przedsiębiorstwa zajmują największą część badań i analiz, poświęconych bliźniakom cyfrowym. Jednocześnie, można zaobserwować silne rozproszenie podobszarów tych analiz z wyraźną dominacją przemysłu produkcyjnego. Poza przemysłem produkcyjnym, do najczęściej analizowanych podobszarów można zaliczyć przemysły: lotniczy, energetyczny, motoryzacyjny, morski, rafineryjny i wydobywczy. Opracowania naukowe nt. przedsiębiorstw nieprodukcyjnych stanowią łącznie mniejszy odsetek publikacji niż dot. przemysłu produkcyjnego (Enders i Hossbach, 2019, s. 6).

Przedsiębiorstwa szczególnie rzadko dbają o dostateczny poziom transformacji gromadzonych danych, informacji i wiedzy do postaci cyfrowej. Tym rzadziej, uzyskana w oparciu o dane wiedza jest w zrozumiały sposób dystrybuowana wśród pracowników. Uzyskanie wartości w ramach wdrożenia BC wymaga zapewnienia ciągłego integrowania pracowników w proces transformacji oraz ustrukturyzowanej komunikacji, zapewniającej informacyjne pętle zwrotne między pracownikami a kierownictwem w trakcie wdrażania i eksploatacji BC. Takie podejście zapewnia pełny szeroki obraz dojrzałości cyfrowej i daje szansę na dostarczenie wskaźników biznesowych przedsiębiorstwa (Stich, Gudergan i Zeller, 2018, s. 39).

Rzadsze obszary zastosowań BC, jak rolnictwo, sektor publiczny, czy przemysł zbrojeniowy, stanowią mniej niż 5% wszystkich publikacji (West i Blackburn, 2017). Niemniej, ich unikatowy charakter jest często źródłem nowej wiedzy i podejść do wykorzystania narzędzi BC, które potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle. Na przykład w branży zbrojeniowej cyfrowy bliźniak jest skutecznie wykorzystywany do eliminacji nadmiarowych kosztochłonnych procesów utrzymaniowych (Tao, Zhang i Nee, 2019). Analizy kosztów utrzymania sprzętu bojowego wykazały silną zależność kosztową w cyklu życia produktu między kosztami napraw a momentem odkrycia usterki. Badania tej zależności wskazują dalej na ogromne korzyści wynikające z możliwości korelowania powstających usterek z niedoskonałościami konstrukcyjnymi uzbrojenia. Wcześniejsze wykrywanie usterek zmniejsza skalę uszkodzeń i skraca czas naprawy, a skorelowanie ich z projektami konstrukcyjnymi pozwala w trybie ciągłym udoskonalać konstrukcję i unikać podobnych usterek w przyszłości. Tym sposobem wykorzystanie BC w branży zbrojeniowej redukuje łączny koszt utrzymania uzbrojenia, a tym samym neutralizuje aspekt niepewności decyzyjnej związanej z kosztami utrzymania w procesie nabywania nowego uzbrojenia (West, Blackburn, tamże, s. 47-48).

Stąd, główną zakładaną wartością dodaną tej dysertacji dla branży przemysłowej jest zapewnienie powtarzalnego modelu i ścieżek zarządzania danymi w oparciu o źródła z różnych obszarów. Model taki pozwoli na kontrolowane udostępnianie danych partnerom transformacji cyfrowej i tym samym obniżenie ryzyka inwestycyjnego, związanego z wdrażaniem cyfrowych bliźniaków. Dodatkową wartością dodaną powinna być dynamizacja codziennej współpracy nauka-przemysł w zakresie rozwoju bliźniaków cyfrowych.

Z naukowego punktu widzenia wartością dodaną tej dysertacji jest uporządkowanie pojęć dotyczących dojrzałości przedsiębiorstw w kontekście zarządzania danymi oraz określenie w oparciu o dotychczasowe badania powtarzalnego modelu wzrostu dojrzałości i

wdrażania bliźniaka cyfrowego w postaci symulacyjnego modelu zarządzania danymi, jak również wskazanie luk badawczych i kierunków dalszych badań w zakresie optymalizacji procesów związanych z akwizycją, przetwarzaniem, analizowaniem i udostępnianiem danych BC.

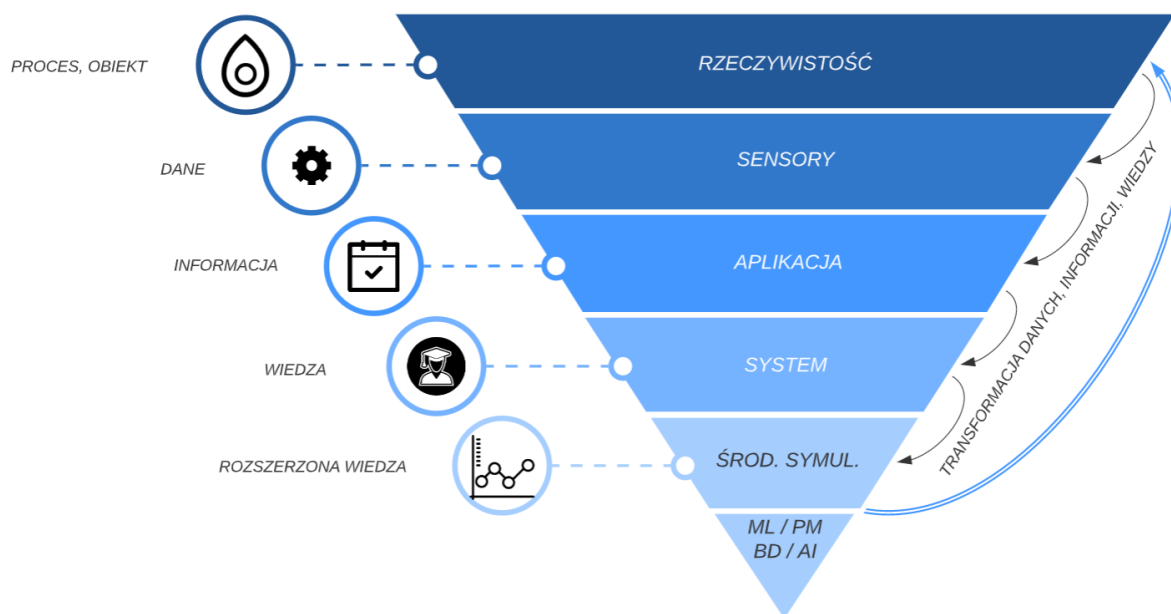
Heterogeniczność technologii i obszarów zastosowań BC stanowi z jednej strony potężne wyzwanie naukowe i techniczne. Z drugiej strony kryje w sobie nieoceniony potencjał do poprawiania naszego otoczenia w wielu wymiarach życia i pracy. W ramach każdego z obszarów zastosowań BC, analizowane narzędzia, wymiary, parametry, rodzaje, metody i podejścia kształtują entropiczną przestrzeń intelektualno-uitylitarną, zmierzającą do standaryzacji, ujednolicenia i łączenia odrębnych dotąd elementów i obszarów. W skrajnie rozczłonkowanym obszarze zdrowia, podzielonym na poziomy genów i molekuł, poszczególnych organów, układów anatomicznych i procesów, naukowcy upatrują przełomu w usprawnieniu wymiany danych i połączeniu modeli symulacyjnych. Podobnie w obszarach zarządzania inteligentnym miastem, jak i w przemyśle, ogromny potencjał dostrzegany jest w integracji wirtualnych narzędzi, systemów, bliźniaków cyfrowych, w celu podniesienia dokładności i spójności symulowanych predykcji, usprawnień i modyfikacji.

4.2 Opracowanie podstaw teoretycznych dla wymagań bliźniaków cyfrowych w zakresie danych

4.2.1 Transformacja: dane - informacje – wiedza

Dane w postaci liczb, symboli, zapisów zdarzeń i innych faktów stają się **informacjami** po ich zestawieniu, pogrupowaniu, zarejestrowaniu i interpretacji z perspektywy określonego celu w sposób użyteczny dla odbiorcy. Dalsze przetwarzanie informacji prowadzi do powstania **wiedzy**, czyli świadomości i zrozumienia informacji oraz umiejętności ich wartościowego wykorzystania (Grobela, 2021, s. 25). Ścisłe zależności między danymi, informacjami i wiedzą powodują, że jakość zasobów wiedzy w przedsiębiorstwie jest ściśle zależna od jakości danych i narzędzi ich gromadzenia i przetwarzania, a także od umiejętnego zarządzania danymi, informacjami i narzędziami, wspierającymi tworzenie wiedzy. Informacja staje się elementem, czy też jednostką wiedzy, z chwilą umieszczenia jej w zbiorze wiedzy użytkownika indywidualnego, bądź zbiorowego. W zasób wiedzy, tworzący kontekst przetwarzania informacji wchodzi też wiedza użytkownika niejawną, czyli posiadana przez użytkownika, lecz niezwerbalizowana, trudna do wyartykułowania (<http://www.inzynieriwiedzy.pl/wiedza/wiedza-informacje-dane>, 15.06.2022 r.).

Dominujący aktualnie w środowisku naukowym model teoretyczny transformacji wiedzy w postaci piramidy *DIK* (z ang.: *data-information-knowledge*) jest coraz częściej poddawany krytyce ze względu na braki w zakresie badań empirycznych (Hautala, 2021). W kontekście cyfrowych narzędzi transformacji przedsiębiorstw, pojawiają się niespotykane dotąd obiekty, zdarzenia i fakty, wymagające uzupełnienia bądź rekonstrukcji piramidy *DIK*. Przetwarzanie wiedzy przez roboty, współtworzenie danych w relacji człowiek-kobot, przetwarzanie ogromnych ilości danych poza kontrolą i wiedzą zainteresowanych stron, czy konstruowanie wiedzy w oparciu o dane niepełne lub o ograniczonej wiarygodności stanowią nowe wyzwania, skłaniające do dyskusji na temat konstruktów *DIK*. Ciekawym podejściem jest np. odwrócenie piramidy (Hautala, tamże). Jest ono szczególnie interesujące w kontekście masowej kumulacji redundantnych danych i konieczności ich inteligentnej deduplikacji i redukcji w celu nadania danym znaczenia, wartości i wiarygodności. W tym podejściu odwrócona piramida *DIK* reprezentuje proces kompresji danych i informacji. W kontekście wirtualnych odwzorowań rzeczywistości, skoncentrowanych na poprawianiu rzeczywistości, odwróconą piramidę *DIK* można też rozszerzyć o warstwy obserwacji rzeczywistości (podstawa odwróconej piramidy) oraz wiedzy, którą w dysertacji nazwano wiedzą rozszerzoną (szczyt odwróconej piramidy *DIK*), ponieważ wykracza ona poza znane definicje wiedzy. Rozszerzoną i odwróconą piramidę *DIK* prezentuje Rysunek 4.1. Na przedstawionym obrazie zaznaczono dodatkowo kierunki transformacji informacji danych i wiedzy pomiędzy warstwami piramidy oraz pętlę zwrotną ze środowiska symulacyjnego do rzeczywistości.



Rys. 4.1. Rozszerzona (odwrócona) piramida *DIK*

Źródło: opracowanie własne

W dysertacji abstrahuje się od rozważań na temat wyższości zdolności poznawczych ludzkich nad maszynowymi. Model rozszerzony o mądrość - DIK(W) - wymusza perspektywę osobocentryczną, skupioną na uczeniu, rozumieniu, opiniach eksperckich i percepcji (Rowley, 2007, s. 172). Jednakże wątek mądrości (z ang.: *W - wisdom*) w literaturze powoduje więcej zamętu i niedopowiedzeń niż uporządkowania i zdaje się służyć głównie podkreśleniu ważności cech i umiejętności ludzkich zamiast zmierzać do uchwycenia i wyjaśnienia wartości dodanej modelu dane-informacje-wiedza, tj. DIK. Tymczasem dla potrzeb rozprawy krytyczne jest określenie wartości, generowanej przez BC bez względu na wartość udziału w tym procesie czynnika ludzkiego. Podejście osobocentryczne, skupione na rozumieniu i percepcji, mogłoby więc powodować nieuzasadnione zaburzenie perspektywy celu rozprawy. Dlatego w dysertacji przyjmuje się podstawową definicję wiedzy jako „zbioru informacji i doświadczeń (z ang.: *know-how*), umożliwiającego transformację informacji w instrukcje” (Ackoff, 1989).

Zdefiniowane w literaturze podstawowe rozumienie wiedzy pozwala w jasny sposób zidentyfikować i zdefiniować wkład narzędzi cyfrowych, takich jak BC, w generowanie nowej wiedzy. Rozpatrując wiedzę jako zasób na linii czasu, można stwierdzić, że w odróżnieniu wiedzy, definiowanej jako informacje osadzone w kontekście umysłu odbiorcy – tj. w czasie teraźniejszym – maszyna ma możliwość zasymulowania przyszłego wielowymiarowego kontekstu, środowiska i czynników dla przetwarzanych informacji. Takie przeniesienie informacji i danych o zdarzeniu, procesie, obiekcie przyszłym w kontekst otoczenia, jakie z wysokim poziomem prawdopodobieństwa zaistnieje w przyszłości nazwano w rozprawie wiedzą rozszerzoną (z ang.: *augmented knowledge*) i przedstawiono graficznie jako szczyt odwróconej piramidy DIK na Rysunku 4.1. Wiedza rozszerzona stanowi zupełnie nowy obszar wiedzy, wykraczający poza jej dotychczasową definicję oraz poza znane definicje wiedzy w modelu DIK. Podobnie jak rozszerzona rzeczywistość pozwala odbiorcy przenieść się w wymiarze wizualnym do niedostępnych bez urządzeń immersyjnych przestrzeni, wygenerowanych komputerowo, tak rozszerzona wiedza pozwala odbiorcy przenieść się w wymiarze czasu, do nieosiągalnych bez narzędzi symulacyjnych przyszłych zestawień danych i informacji, zagnieżdżonych w przyszłych procesach i warunkach otoczenia. Jednocześnie wynik symulacji nie stanowi wyniku procesu poznawczego, percepcji, czy rozumienia osoby ani grupy osób, a zatem wykracza poza definicję mądrości w modelu DIK.

Bliźniak cyfrowy jako narzędzie, wspierające transmisję i transformację danych na informacje i wiedzę, zawiera duży potencjał dla rozwoju przedsiębiorstwa wg paradygmatu gospodarki opartej na wiedzy. BC z jednej strony otwiera szerokie możliwości kumulacji,

kompresji, porządkowania i przetwarzania ogromnych ilości danych, pochodzących z nieosiągalnych dotąd źródeł, a z drugiej strony stanowi narzędzie transformacji danych i informacji na wiedzę.

4.2.2 Przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym

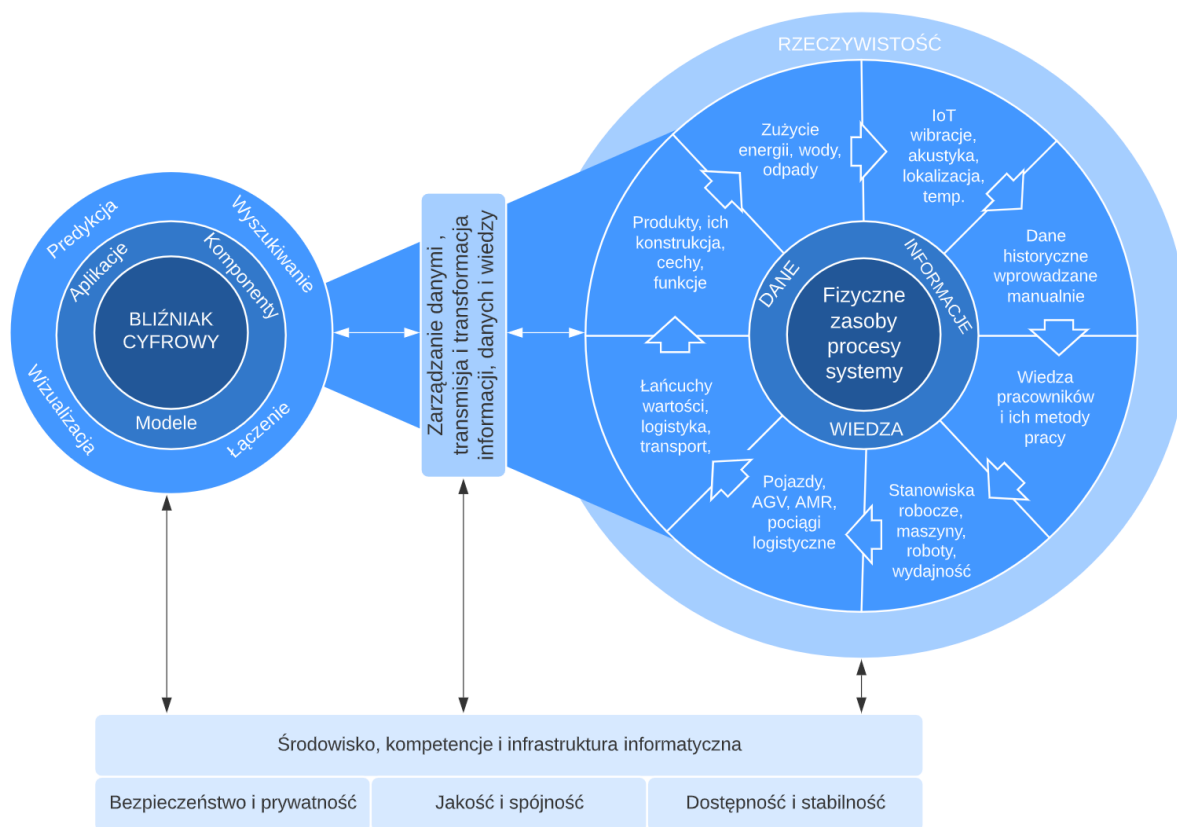
Bliźniak cyfrowy stawiany jest pośród najważniejszych narzędzi inicjatyw Przemysłu 4.0 i transformacji cyfrowej przedsiębiorstw. Narzędzie to pozwala bowiem gromadzić i porządkować rosnącą ilość danych oraz budować nową wiedzę w przedsiębiorstwie na wszystkich etapach cyklu życia produktu, jak i całego przedsiębiorstwa. Ponadto, w odróżnieniu od innych narzędzi Przemysłu 4.0, jak technologie wizyjne, czy systemy osadzone, BC można adaptować do dowolnego poziomu szczegółowości, zgodnie z aspiracjami cyfrowymi przedsiębiorstwa, uzyskując modyfikowalne odzwierciedlenie fizycznego produktu, systemu, lub procesu. Połączenie wirtualnego modelu BC z jego fizycznym odpowiednikiem stanowi przestrzeń danych (Luiz, 2018, s. 204). Od modelu dojrzałości w zakresie zarządzania tą przestrzenią i danymi oraz od jakości samych danych zależy jakość interfejsu pomiędzy bliźniakiem cyfrowym a fizycznym i jakość wszystkich wyników, uzyskiwanych podczas ich stosowania, w tym jakość uzyskiwanej nowej wiedzy.

Podczas gdy najczęściej wymienianym w literaturze aspektem zarządzania danymi w kontekście BC jest przesyłanie i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym (Luiz, 2018, s. 204), przeprowadzona z udziałem przedsiębiorstw analiza oczekiwań i poziomów dojrzałości przedsiębiorstw wskazuje, że taki tryb przetwarzania danych znajduje się poza obrębem ich zainteresowań i potrzeb. Podobnie, w przypadku bezszwowej integracji bliźniaka cyfrowego z jego fizycznym odpowiednikiem – jest ona oczekiwana rzadko, wybiórczo i tylko w kontekście szerzej zdefiniowanych celów biznesowych.

4.2.3 Abstrakt graficzny transmisji i transformacji danych.

Świadome i metodyczne zarządzanie danymi w przedsiębiorstwie pozwala uchwycić ich istotę podczas bieżącej transmisji danych, informacji i wiedzy pomiędzy urządzeniami, systemami i ludźmi w rzeczywistości fizycznej do systemu wirtualnego, jak i w przeciwnym kierunku.

Zarządzanie danymi na linii przepływu danych między odpowiednikami fizycznym a wirtualnym odbywa się zgodnie z zaplanowanymi procedurami, standardami i politykami gromadzenia, przetwarzania i udostępniania danych. Wartość nowej wiedzy generowanej przez BC w przedsiębiorstwie jest zależna od jakości i spójności transmisji danych, prowadzonej w środowisku infrastruktury informatycznej, skonfigurowanej z myślą o wdrożeniu BC w kontekście celów biznesowych przedsiębiorstwa. Infrastruktura informatyczna odpowiada też za możliwość pozyskania odpowiednich danych z odpowiednich miejsc, w odpowiedniej ilości i czasie, czyli za dostępność i stabilność akwizycji i transmisji warstw aplikacyjnej i transportowej. Ponadto, warstwa aplikacji obejmuje zabezpieczenie danych przed zagrożeniami wewnętrznymi i zewnętrznymi oraz prywatności danych wrażliwych, czyli za cyberbezpieczeństwo procesów transmisji i transformacji. Graficzny abstrakt przepływu danych, informacji i wiedzy między środowiskami fizycznym (rzeczywistość) a wirtualnym (bliźniak cyfrowy) przy użyciu infrastruktury informatycznej przedstawia Rysunek 4.2.



Rys. 4.2 Abstrakt graficzny transmisji i transformacji informacji, danych i wiedzy

Źródło: opracowanie własne

Przedstawione na Rysunku 4.2 obiekty i procesy mają charakter generyczny, tzn. reprezentują grupy konkretnych obiektów lub procesów o podobnych cechach, i obejmują szeroki wachlarz podobszarów zastosowań BC w przedsiębiorstwach.

4.2.4 Interesariusze danych – definicja relacji w kontekście bliźniaka cyfrowego

W zarządzaniu danymi można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje relacji. Relacja jeden do jeden, jeden do wielu oraz wiele do wielu. W przypadku BC dominują relacje wiele do wielu, gdzie wiele źródeł danych i informacji generuje wiedzę, konsumowaną następnie przez wielu odbiorców.

Dodatkowo, relacje danych mogą być zorganizowane hierarchicznie lub niehierarchicznie, np. w przypadku wizualizacji, kiedy należy wyświetlić hierarchiczne informacje w taki sposób, aby odbiorca mógł zachować swoją mapę myślową w odbiorze zbioru danych i uzyskać bądź dodawać informacje nie powodując nieporozumień i błędów (Carpendale, 2005, s.1).

W przypadku BC, krytyczne znaczenie dla generowanej wartości w postaci nowej wiedzy, ma zarządzanie relacjami pomiędzy uczestnikami procesów transmisji i transformacji danych i informacji. Relacje są ogólnie rozumiane jako „*sposób w jaki dwie lub więcej osób lub rzeczy są połączone oraz wpływ jednej osoby lub rzeczy na drugą*” (Oxford English Dictionary, 2022)

W procesie transmisji i transformacji danych, informacji i wiedzy uczestniczą trzy grupy zainteresowanych - twórcy, konsumenci i administratorzy. Szczególną rolą jest dysponent lub właściciel danych, który może być w każdej z wcześniej wymienionych grup.

W tworzeniu danych w przedsiębiorstwie uczestniczą na różnych etapach wszyscy pracownicy działów zaangażowanych w transformację cyfrową. Twórcy zajmują się głównie produkowaniem, uzyskiwaniem, gromadzeniem i zapisem surowych danych. Ich zaangażowanie w proces może być nieświadome, kiedy dane są wynikiem ich pracy, lecz nie są przez nich wprowadzane do systemu, lub świadome, kiedy pracownik świadomie rejestruje dane w systemie.

Administratorzy danych zawsze świadomie uczestniczą w procesie transmisji i transformacji danych. Odpowiadają za uporządkowane gromadzenie danych, ich strukturyzację, opisywanie, przechowywanie, przetwarzanie, ustalanie polityk standardów, architektur, zasad bezpieczeństwa, dostępu, wymagań i ograniczeń.

Konsumentami danych są osoby wskazane przez cel biznesowy utworzenia BC. Mogą to być np. projektanci lub konstruktorzy produktów, kiedy celem BC jest modyfikacja albo opracowanie nowego produktu, albo kierownictwo produkcji kiedy celem BC jest optymalizacja procesu produkcyjnego lub intralogistycznego.

4.2.5 Definicja danych i zarządzania danymi dla potrzeb dysertacji

W dysertacji przyjęto, że „*Dane stanowią matematycznie przeanalizowane, wybrane aspekty obserwacji zachowań*” (Coombs, 1964). Dane definiowane są również jako „*(...)to co wiemy lub zakładamy, że jest faktem i co stanowi podstawę do przemyśleń lub obliczeń*” (Oxford English Dictionary, 2022). Natomiast w kontekście symulacji obliczeniowych, definicja danych mówi, że są to „*(...) ilości, znaki, bądź symbole, na których komputer prowadzi obliczenia, które mogą być przechowywane lub transmitowane w formie sygnałów elektrycznych i nagrywane na nośnikach magnetycznych, optycznych lub mechanicznych*” (Oxford English Dictionary, 2022).

Podjęcie aktualnych wyzwań w obszarach dużych zbiorów danych (z ang.: *big data*), od obserwacji i odwzorowania obiektów i grup obiektów, ruchów sejsmicznych, poprzez tworzenie modeli 3D, planowanie produkcji, predykcję awarii, aż po przewidywanie przyszłych zdarzeń w kontrolowanych środowiskach, nie byłoby możliwe bez zarządzania danymi. W każdym wirtualnym odwzorowaniu rzeczywistości zarządzanie danymi stanowi krytyczne spoiwo między akwizycją danych, tworzeniem modelu, wizualizacją i przetwarzaniem danych w ramach symulacji. Zarządzanie danymi nie tylko porządkuje, nadaje strukturę i klasyfikuje procesy, lecz również zapewnia dostępność danych, ich przydatność do ponownego użycia (z ang.: *reusability*) oraz pomaga uzyskać inne parametry danych i symulacji, wymienione w sekcji 2.3 niniejszego rozdziału (Al-Doori i in., 2020).

Zarządzanie danymi i ich jakością jest krytycznym aspektem skutecznego funkcjonowania narzędzi cyfrowych. Tworzymy i przetwarzamy dane w niespotykanej dotąd skali i tempie, a ilość przetwarzanych przez przedsiębiorstwa danych stale wzrasta. Ogromne ilości przetwarzanych danych wymuszają na przedsiębiorstwach sięganie po coraz bardziej zaawansowane metody i narzędzia zarządzania danymi.

Zarządzanie danymi jest procesem pozyskiwania, walidacji, przechowywania i przetwarzania danych w celu zapewnienia użytkownikom terminowego dostępu do wiarygodnych informacji i wiedzy. Zaawansowane narzędzia i platformy przetwarzania danych

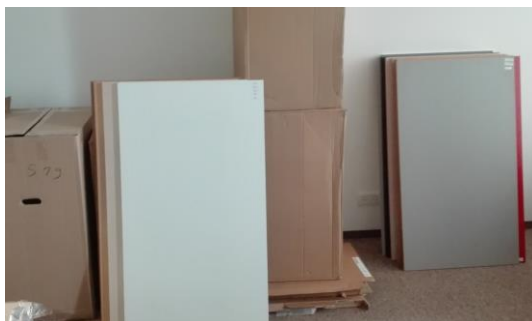
umożliwiają angażowanie klientów w procesy przedsiębiorstwa oraz wgląd w historyczne, bieżące i prognozowane zachowania klientów (<https://datascience.eu/pl/wiki-pl/co-to-jest-zarządzanie-danymi/>, 2022).

Skuteczne zarządzanie jakością danych w przedsiębiorstwie wymaga dwóch elementów, modelu referencyjnego oraz modelu oceniającego, który pozwoliłby odnieść aktywność przedsiębiorstwa do modelu referencyjnego i docelowo wskazać systematyczną ścieżkę do poprawienia analizowanych procesów (Caballero i in., 2022).

4.2.6 Zarządzanie danymi – przykładowe studia przypadku

Ciekawy przykład obrazujący zarządzanie danymi w przypadku obiektowego bliźniaka cyfrowego stanowi fotorealistyczna aranżacja wnętrz przy użyciu mebli polskiego producenta.

W tym przypadku przedstawianymi w postaci cyfrowej obiektami rzeczywistości są elementy wyposażenia, takie jak meble, drzwi, okna, podłogi, czy lampy oraz pomieszczenia, w których te elementy wyposażenia są umieszczane. Przykładowe elementy wyposażenia gromadzone celem cyfryzacji przedstawia Rysunek 4.3.



Rys. 4.3. Próbkę wyposażenia gromadzone celem cyfryzacji w laboratorium zaawansowanej wizualizacji

Źródło: opracowanie własne w oparciu o fotografie Miłosza Ciżnickiego

Główne źródło danych w tym przypadku stanowią fizycznie istniejące kolekcje wyposażeniowe. Celem digitalizacji trafiają one do laboratorium fotograficznego, gdzie przy użyciu wysokiej jakości sprzętu fotograficznego, oświetlenia, skanerów i sensorów haptycznych opracowywane są próbki poszczególnych form i powierzchni, ich kolorystyka, struktura powierzchni, kształty i wymiary. Przykład elementów wyposażenia w trakcie procesu cyfryzacji przedstawia Rysunek 4.4.



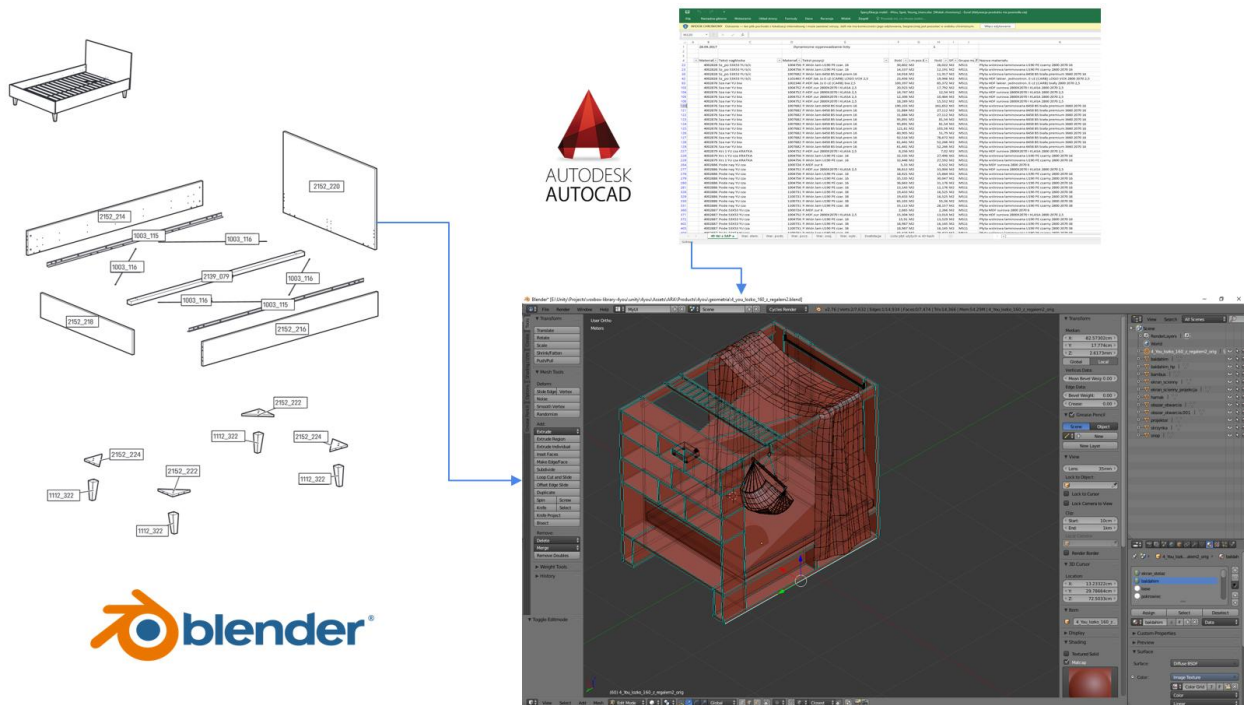
Rys. 4.4. Elementy wyposażenia podczas cyfryzacji w laboratorium zaawansowanej wizualizacji

Źródło: opracowanie własne w oparciu o fotografie Miłosza Ciżnickiego

Celem tworzonego BC jest uzyskanie jak najwierniejszego odwzorowania rzeczywistości, dlatego w tym przypadku każdy z cyfryzowanych elementów jest opisywany wielowymiarowo i w największej granulacji, na jaką pozwalają urządzenia akwizycji obrazu i danych. Dane obiektów wzbogacana są o metadane i atrybuty, umożliwiające ich bezbłędne wykorzystanie w dalszych krokach cyfryzacji, które już na tym etapie muszą być zdefiniowane, aby uniknąć późniejszej restrukturyzacji, zmian architektury, czy modyfikacji jakościowej całych zbiorów danych.

W kolejnym kroku opracowane dane trafiają do aplikacji, umożliwiających proceduralne wytworzenie materiałów w przestrzeni wirtualnej, takich jak Autodesk, Substance Designer, Blender, czy Studio 3Dmax. Każda z aplikacji odpowiada za inny aspekt odwzorowania rzeczywistości. Wśród cyfryzowanych aspektów rzeczywistości znajdują się konstruowanie przestrzennych siatek obiektów, nakładanie na siatki przestrzenne kolorystyki i struktur powierzchni, wzbogacanie obiektów o cechy wizualne zależne od otoczenia, jak refleksy świetlne zależne od połyskliwości, gradacje cieniowania zależne od światłochłonności materiału, czy metaliczność; wzbogacanie obiektów o cechy mechaniczne, jak wytrzymałość pod obciążeniem, możliwość otwierania, przesuwania, uginania, itp. Uzyskane w ten sposób dane mają postać plików, po jednym dla każdego obiektu w każdym z aspektów rzeczywistości. Po skompilowaniu pliki te pozwalają ocenić i poddać walidacji wierność odwzorowania obiektu w poszczególnych aspektach. Przykłady danych o obiektach w omawianych aspektach przedstawia Rysunek 4.5.

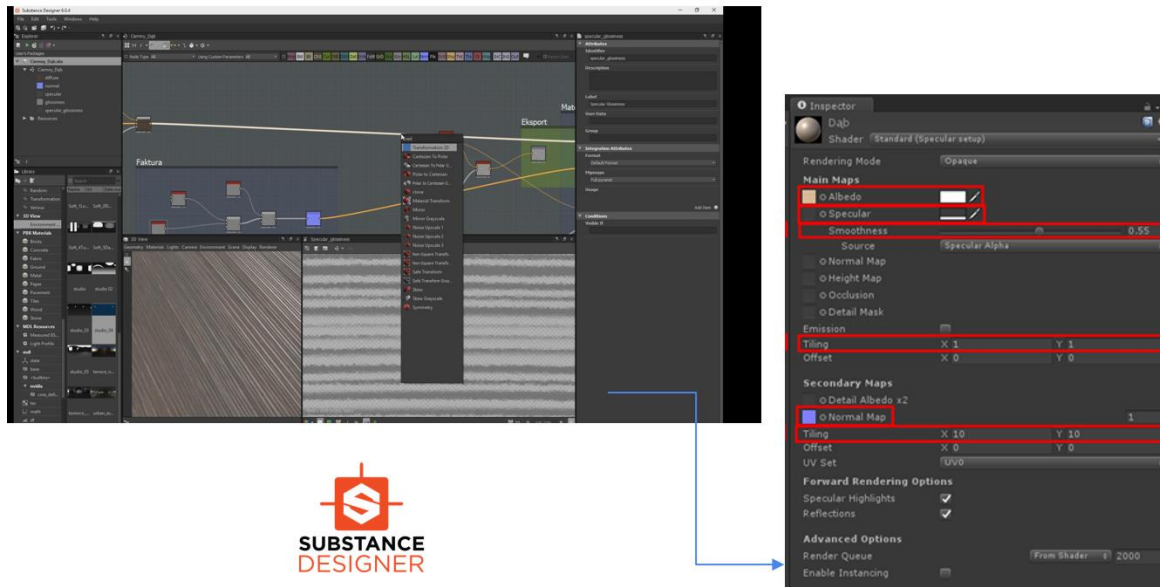
A)



B)



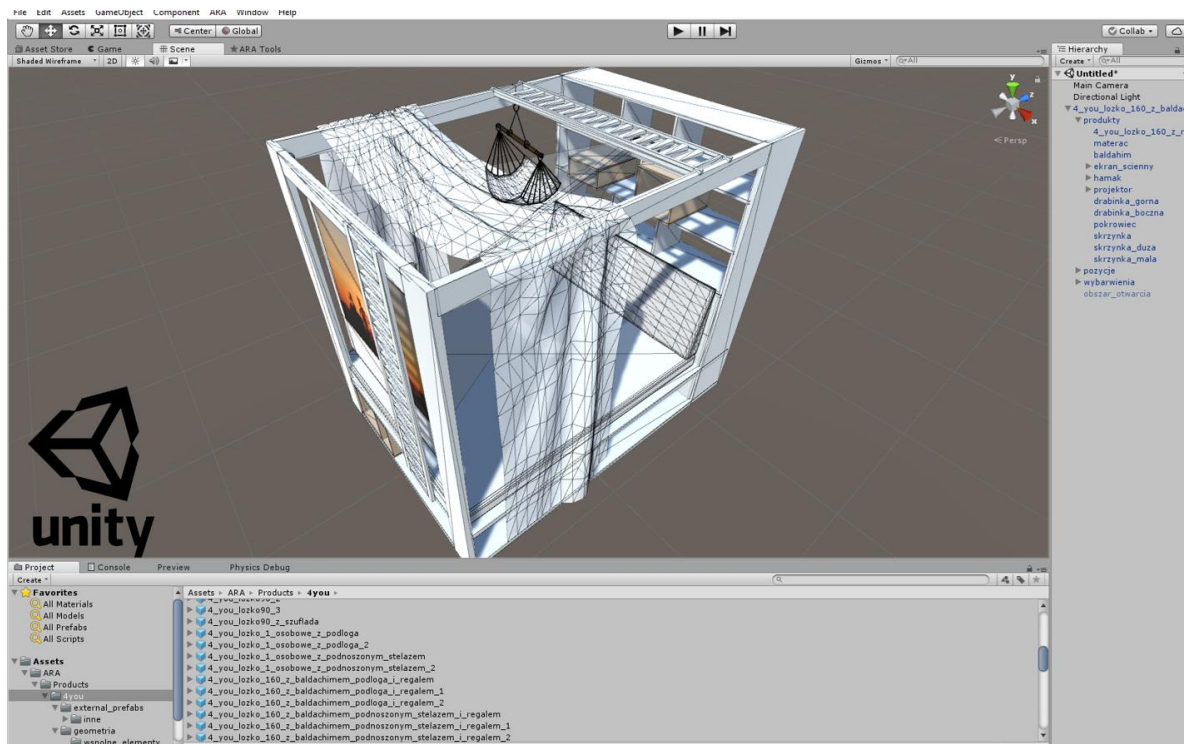
C)



Rys. 4.5. Przykłady wizualizacji danych o obiektach w poszczególnych aplikacjach, odpowiadających odpowiednio za A) wymiary i formę obiektu, B) strukturę powierzchni materiału miękkiego, C) światło i cień materiału

Źródło: opracowanie własne

Tak opracowane pliki z danymi o funkcjach i cechach obiektów w poszczególnych aspektach rzeczywistości trafiają następnie do systemu, łączącego opracowane dane i informacje w spójną całość modelu cyfrowego obiektu, w tym przypadku na platformę Unity. Dopiero na tym etapie możliwe jest zweryfikowanie tworzonych modeli pod kątem ich jakości wizualnej – kluczowej w przypadku omawianego BC. Obserwowanie i modyfikowanie modelu na tym poziomie pozwala kształtować w rzeczywistości wirtualnej jego cechy, funkcjonalności i formę, dostarczając wiedzy o potencjalnych efektach zmian w obrębie obiektu, odzwierciedlanego w postaci cyfrowej. Przykład wizualnego modelu obiektu meblowego na platformie Unity przedstawia Rys. 4.6.



Rys. 4.6. Przykład modelu cyfrowego, łączącego szereg plików, odpowiadających za poszczególne aspekty zachowania cyfryzowanego obiektu fizycznego

Źródło: opracowanie własne

Kolejny poziom integracji danych BC na odwróconej piramidzie DIK, stanowi zintegrowany system zarządzania, który w tym przypadku pozwala na umieszczenie obiektu, lub grupy obiektów w procesie aranżacji sceny czy pomieszczenia. Zintegrowany system sięga po pliki, uporządkowane w bibliotekach danych, zgodnie z zamówieniem użytkownika, wyrażonym poprzez wskazanie obiektu na interfejsie użytkownika i wybranie opcji do modyfikacji. Ten poziom integracji BC z jednej strony wymaga eksperckiej wiedzy projektanta wewnątrz o metodach aranżacji i doświadczenia, aby w mądry sposób zaaranżować wnętrze. Jednocześnie system pozwala wzmocnić mądrość eksperta, dostarczając drobiazgowej wizualizacji projektowanego układu obiektów w przestrzeni. Przykład obiektu, osadzonego w procesie aranżacji i wybranego do przemieszczenia i modyfikacji obrazuje Rysunek 4.7.



Rys. 4.7. Przykład obiektu, osadzonego w procesie aranżacji w zintegrowanym systemie zarządzania
 Źródło: opracowanie własne

Na kolejnym poziomie integracji BC, system sztucznej inteligencji *AI* (z ang.: *Artificial Intelligence*), w oparciu o dane nt. tysięcy wykonywanych w zintegrowanym systemie projektów aranżacji i podejmowanych w tym procesie decyzji, uczy się w jakich kontekstach jakie decyzje o rozmieszczeniu umeblowania podejmują użytkownicy. Ten proces współtworzenia (z ang.: *crowdsourcingu*) wiedzy pozwala generować alternatywne, zoptymalizowane w oparciu o rozproszoną wiedzę historyczną tysięcy użytkowników, scenariusze przyszłych procesów aranżacji wnętrz i prezentować je w nowych kontekstach nowym użytkownikom. Przykładowa potencjalna wizualizacja danych przetworzonych przez system *AI* do postaci propozycji aranżacji grupy obiektów w przestrzeni przedstawia Rysunek 4.8.



Rys. 4.8. Przykład wizualizacji grupy obiektów w aranżowanej scenie, potencjalnie wygenerowany przez system *AI*

Źródło: opracowanie własne w oparciu o system VoxBox

Najbardziej zaawansowany stopień integracji BC polega na generowaniu rozszerzonej wiedzy, tj. w tym przypadku alternatywnych scenariuszy przyszłości w oparciu o symulacje wysoce prawdopodobnych i bardzo zbliżonych do rzeczywistych aranżacji przestrzeni.

Szacuje się, że nie więcej niż jedna czwarta danych w przedsiębiorstwach i innych organizacjach stanowi dane ustrukturyzowane, nadające się do przetwarzania, generowania wiedzy (Capurro i in., 2014). Pozostałe dane, generowane manualnie lub automatycznie mogą zawierać wartość informacyjną, lecz ze względu na chaotyczne zarządzanie, braki opisów, atrybutów i nieprzemyślane przepływy, nie nadają się do wtórnego wykorzystania w systemach typu BC i nie wnoszą wartości dla przedsiębiorstw.

Przedsiębiorstwa mają wpływ na to czy gwałtowny napływ danych i informacji stanowi dla nich siłę destabilizującą czy raczej wykorzystują bogactwo danych i informacji jako zasób, podnoszący wartość przedsiębiorstwa oraz jego produktów i usług. Potencjalnie negatywny wpływ na aspekty organizacyjne w przedsiębiorstwach wynika nie tyle z samego faktu wdrażania BC, co z podejścia przedsiębiorstwa, manifestującego wyższość operatorów komputerowych nad ludzkimi. W połączeniu ze skąpą wewnętrzną komunikacją nt. celów i korzyści ze stosowania narzędzi typu BC, zarządzanie skupione tylko na wydajności wykorzystania danych może skutkować zamieszaniem organizacyjnym w innych aspektach działania przedsiębiorstw (Gash i Orlikowski, 1994).

W niniejszym rozdziale przedstawiono szanse, narzędzia i przykłady korzystnego wykorzystania napływu danych w przedsiębiorstwach. Jednak z analizy literatury wynika, że potencjał tego zasobu jest dużo większy niż aktualnie obserwowany oraz że przedsiębiorstwa znajdują się na początku drogi do efektywnego i wydajnego zarządzania danymi jako aktywem. W praktyce wiele przytaczanych przykładów wykorzystania danych w przemyśle do prowadzenia analiz przy użyciu sztucznej inteligencji, bliźniaków cyfrowych i innych narzędzi symulacyjnych ma charakter informacyjny, lecz rzadko tworzona w ten sposób wiedza przechodzi dalej, poza etap opracowania koncepcji, bądź prototypu. Zidentyfikowano swego rodzaju błędne koło, które utrudnia praktyczne wykorzystanie generowanej przez narzędzia symulacyjne rozszerzonej wiedzy, koncepcji, prototypów w praktyce (Bosch i in., 2022). Zidentyfikowano również liczne bariery i czynniki, wpływające na niski poziom korzystnego wykorzystania zasobów danych przez przedsiębiorstwa, jak choćby kwestie etyczne i inne aspekty pracy człowieka w otoczeniu maszyn, robotów i algorytmów.

Determinacja przedsiębiorstw w prowadzeniu transformacji cyfrowej często objawia się obniżeniem jakości warunków pracy w ocenie pracowników przedsiębiorstwa. Niejasność

procesów zarządzania danymi, mechanizmów kierujących algorytmami, cyfryzacja informacji bez wyjaśnienia jej powodów i celów, jakie przedsiębiorstwo zamierza osiągnąć, obniżają zaangażowanie i naturalne dążenie pracowników do rozwoju i współuczestniczenia w transformacji cyfrowej przedsiębiorstwa. Wyzwania na styku człowiek-dane należą też do najczęściej wymienianych w literaturze przyczyn powolnego wzrostu zastosowań bliźniaków cyfrowych i innych narzędzi, bazujących na dużych zbiorach danych (Gal, Jensen i Stein, 2020.). Świadomość tych barier w społeczności naukowej jest duża, co przejawia się choćby w tym fakcie, że aspekt ludzki, w odróżnieniu od innych aspektów, pojawia się we wszystkich analizowanych modelach dojrzałości. Jednocześnie, bariery nie-technologiczne wskazują wyraźnie kierunek do dalszych badań, nie tylko empirycznych, nad metodami zwiększenia skuteczności uwalniania potencjału danych i generowanej dzięki nim rozszerzonej wiedzy w przedsiębiorstwach.

4.3 Opracowanie podstaw teoretycznych w zakresie atrybutów danych i ich gotowości do wykorzystania przez bliźniaka cyfrowego

4.3.1 Definicja atrybutu

W analizie danych atrybutem nazywa się jakościową cechę bądź funkcję, mierzoną dla każdej obserwacji (rekordu) danych, które mogą różnić się między jedną obserwacją, a kolejną (www.statistics.com/glossary/attribute/, 18.06.2022 r.). Atrybuty danych zwykle zapisywane są w postaci tabel, opisujących dane i umożliwiających odnośnienie się do nich w bazach danych, bądź innego typu magazynach danych. Opisy danych w tabelach atrybutów zwykle odnoszą się do cech takich jak np. dynamika, binarność czy lokalizacja, czyli do cech innych niż wymiary, waga, objętość, czy inne cechy ilościowe, które stanowią zmienne danych.

Atrybuty danych są powszechnie wykorzystywane przez obliczeniowe narzędzia symulacyjne, takie jak BC, przetwarzające duże zasoby danych. Dostęp do danych za pośrednictwem ich atrybutów w znacznym stopniu podnosi wydajność przetwarzania dużych ilości danych i przyspiesza funkcjonowanie złożonych algorytmów obliczeniowych. Wśród najczęściej wykorzystywanych ról atrybutów można wyróżnić enkrypcję danych lub grup danych, deduplikację danych, czy redukcję danych redundantnych. Dla przykładu, najnowsze podejścia w przemyśle wydobywczym wykorzystują atrybuty danych sejsmicznych, opisujących ich cechy elektromagnetyczne zdarzeń w czasie. Atrybuty historycznych danych

sejsmicznych analizowane są w czasie zbliżonym do rzeczywistego równoległe z atrybutami obserwowanych ruchów geologicznych, pozwalając na zwinne porównywanie metodą Kalmana obu zestawów danych w predefiniowanych przypadkach. Wyniki takiego podejścia w symulacji modeli sejsmicznych wykazują poprawę trafności predykcji krytycznych parametrów zbiorników podziemnych oraz redukcję niepewności modelu symulacyjnego, w stopniu znacznie przewyższającym analizę surowych danych, jak i analizę samych danych sejsmicznych lub elektromagnetycznych (Hoteit, Katterbauer i Sun, 2014).

W kontekście zarządzania procesami biznesowymi (z ang.: *BPM – Business Process Management*), atrybut danych, stanowiących bazę informacyjną modelu symulacyjnego, odpowiada właściwościom lub cechom obiektu, stanowiącego element zarządzanych zasobów. Klasyfikacja BPM dzieli cechy zarządzanych zasobów na cechy kontekstowe, istniejące w niemal wszystkich procesach, i cechy adaptacyjne, specyficzne dla analizowanego przypadku lub wąskiej grupy przypadków. O ile w przypadku BPM, zarządzanie specyficznymi cechami zasobów uważane jest za niepraktyczne ze względu na nikłą skalowalność tych cech (Ko i in., 2009, s. 781) o tyle w przypadku BC, zdolność sprawnego tworzenia i klasyfikacji atrybutów specyficznych dla danego modelu symulacyjnego jest kluczowa do wdrażania BC i wydajnego zarządzania danymi, co omówiono w kolejnych sekcjach niniejszego rozdziału.

4.3.2 Wpływ atrybutów danych na jakość działania bliźniaka cyfrowego

Szerokie spektrum zastosowań BC powoduje konieczność uporządkowania i sklasyfikowania atrybutów danych dla różnych obszarów i celów ich zastosowań. Atrybut, będący podstawowym komponentem BC, decydującym o jakości wyników symulacji, predykcji, jak i oceny skompresowanych historycznych stanów, wymaga szczególnej uwagi wewnątrz przedsiębiorstwa, jak i w odniesieniu do otoczenia. Często, dane i atrybuty, zapewniające skuteczność BC, znajdują się poza ramami kompetencyjnymi, organizacyjnymi lub prawnymi przedsiębiorstwa, co nie musi przesądzać o ich niedostępności, pod warunkiem konsekwentnego i przemyślanego zarządzania procesami zarządzania danymi wraz z atrybutami (Kukartsev, 2020, s.3).

W kontekście przedsiębiorstw decyzje są podejmowane w oparciu o niepełne i niepewne dane, co wymusza stosowanie narzędzi stochastycznych, tj. uwzględniających możliwość wystąpienia czynników losowych i ograniczających niepewność wyników. Nawet w przypadku wysokiego poziomu dojrzałości cyfrowej, przedsiębiorstwo zwykle opiera swoje

przewidywania i decyzje o dane niepełne i niepewne. Stąd, jednym z podstawowych założeń modeli symulacyjnych BC jest niepewność i niekompletność danych i ich atrybutów. Optymalizacja symulacji wirtualnego odpowiednika fizycznie istniejącego systemu zwykle prowadzona jest na modelach stochastycznych. Zawierają one cechy zarówno ilościowe, jak i jakościowe. Najnowsze badania wskazują, że stochastyczne modele symulacyjne pozwalają znacznie obniżyć poziom niepewności i podnieść trafność predykcji, umieszczając atrybuty jakościowe w ilościowych modelach symulacyjnych. Większość programów symulacyjnych nie umożliwia bezpośredniego dodawania opisów jakościowych do modelu. Dlatego wzbogacanie danych o atrybuty, zawierające wiedzę ekspercką, czy służące wnioskowaniu w określonych stopniach niepewności, hierarchia struktury modelu umożliwia dodawanie atrybutów jakościowych i ilościowych zmiennych (Chai i in., 2013).

Wśród atrybutów danych, najczęściej analizowanych w kontekście ich wykorzystania przez zaawansowane narzędzia analityczne, takie jak BC, należy wyróżnić ich jakość, wrażliwość, bezpieczeństwo, dostępność, wykrywalność i użyteczność (Ardagna i in., 2016).

Z jednej strony o jakości modelu symulacyjnego świadczy wierność odwzorowania funkcji i cech fizycznego obiektu lub procesu w postaci atrybutów danych, reprezentujących ten obiekt lub proces w środowisku wirtualnym. Z drugiej zaś strony, poddane cyfryzacji obiekty i procesy posiadają wiele atrybutów, które są nieistotne dla celów prowadzonych symulacji, tj. nie wpływają na zachowanie modelu w czasie bądź na stany modelu, generowane w określonym celu BC (Crespi, Lee i Minerva, 2020, s. 12).

Wnioskując z literatury, można wyodrębnić trzy główne kategorie atrybutów danych w kontekście wykorzystania ich przez środowisko symulacyjne bliźniaków cyfrowych:

- a) atrybuty pożądane (wystarczające do użycia w symulacji bez przetworzenia),
- b) atrybuty potencjalnie przydatne (wymagające przetworzenia celem wykorzystania przez BC),
- c) atrybuty nieistotne (zbędne, nie wpływające na wyniki działania BC).

O przydatności atrybutu poza przedmiotem charakteryzowanej przez niego właściwości w postaci cech, statusów, zdarzeń, akcji, itd., decydują dodatkowo inne specyficzne dla BC czynniki. Na przykład dla bliźniaka cyfrowego procesowego, który poza obiektami odwzorowuje również zmienne w czasie procesy, niezwykle ważnym czynnikiem każdego z atrybutów jest dostępność ich danych zmiennych w czasie. W tym kontekście, pożądane atrybuty powinny umożliwiać aktualizowanie ich z określoną przez model częstotliwością. Atrybuty danych w takim modelu są prawidłowe, jeśli wszystkie wartości atrybutów obiektu lub procesu fizycznego, istotnych dla bliźniaka cyfrowego, są jednorodnie wskazywane w

każdym kolejnym odzwierciedleniu na przestrzeni czasu (Crespi, Lee i Minerva, 2020, s. 13). Atrybut zmienny w czasie ma często postać trzech zmiennych (równanie 1):

$$\text{atrybut } x = (\text{znacznik czasu; lokalizacja; wartość atrybutu } x) \quad (1)$$

Poza kategoriami przydatności atrybutów i ich zdolności do aktualizacji w czasie, w literaturze pojawiają się inne czynniki, specyficzne dla poszczególnych wdrożeń. Można wyróżnić następujące kategorie tych czynników:

- a) reprezentacja i adekwatność kontekstu – wierność odwzorowania odpowiednika fizycznego w aspektach istotnych dla celów BC;
- b) lustrzane odbicie – ten czynnik odpowiada za wspomnianą wyżej zdolność do aktualizowania zmiennych w czasie na podobieństwo lustrzanego odbicia, które bez opóźnień odzwierciedla zmiany po stronie źródła odbijanego obrazu;
- c) replikacyjność – zdolność do zapewnienia wysokiej jakości replikacji obiektu fizycznego; często BC tworzy wiele replikacji tego samego obiektu, spośród których model powinien wybierać te o najwyższym stopniu spójności z innymi danymi i wierności odzwierciedlenia;
- d) bliskość – określa jak szybko, wiernie i sprawnie (w znaczeniu łączności technicznej) odzwierciedlenie wirtualne jest generowane i przekazywane do kolejnych aplikacji lub modułów systemu;
- e) przydatność w zarządzaniu / niezawodność – ten czynnik odróżnia odpowiednik fizyczny od wirtualnego; o ile obiekt fizyczny może ulec uszkodzeniu, uniemożliwiając szybkie przywrócenie sprawności, jego wirtualny odpowiednik w tym czasie przechodzi do stanu odświeżania, zachowując pełne informacje na temat wcześniejszych stanów, umożliwiając szybkie przywrócenie do stanu historycznego, jak i umożliwiając identyfikowanie i definiowanie polityk unikania awarii w odpowiedniku rzeczywistym;
- f) zdolność i jakość zapisu – BC generuje ogromne ilości danych w czasie o samych obiektach i procesach, które mogą być wzbogacone o informacje i dane kontekstowe; czynnik zdolności i jakości zapisu określa zdolność atrybutów do bycia zapisanymi w postaci kopii w sposób wydajny i bez utraty istotnych dla użytkownika informacji;
- g) przewidywalność – bardzo ważny czynnik w kontekście BC, który określa łatwość syntetycznego generowania przez BC tego atrybutu podczas symulowanych predykcji;

- h) przynależność – czynnik określa prawne aspekty dotyczące możliwości decydowania o tym kto i w jakich celach może wykorzystywać opisywane przez atrybut dane (Crespi, Lee i Minerva, 2020, s. 15-17).

Pozytywna ocena atrybutów w kategorii przydatności i pozostałych stanowi podstawę do uznania atrybutu za kwalifikowalny i włączenia danych do zbioru danych testowych. Zbiór danych testowych służy zbudowaniu modelu testowego, którego jednym z zadań jest walidacja danych i atrybutów. W uzasadnionych przypadkach dokonywana jest dalsza modyfikacja parametrów kwalifikujących. Walidacja modelu w drodze testowania może wymagać kilkukrotnych powtórzeń, z których każde dostarcza nowych wskazań, aż do ustabilizowania parametrów zasobów cyfrowych przetwarzanych przez model. Za jedną z najbardziej skutecznych metod odróżniania zbiorów danych i atrybutów kwalifikowalnych od niekwalifikowalnych uznawana jest metoda nieliniowej regresji Bates'a (Samuel, 2020, 130-134), która służy przede wszystkim ustaleniu wartości parametrów kwalifikowalności dla każdej z adekwatnych kategorii w celu ich wykorzystania w późniejszych symulacjach testowych.

4.3.3 Zbiory atrybutów – atrybuty uniwersalne, atrybuty specyficzne

Rozbieżność podejść do atrybutów specyficznych, tj. tworzonych z myślą o wykorzystaniu w jednym przypadku, w dziedzinie nauk o zarządzaniu i w dziedzinie nauk technicznych, stanowi barierę we wzajemnym wykorzystaniu opracowywanych metod zarządzania procesami. Podczas gdy twórcy metodyk zarządzania procesami są skoncentrowani na atrybutach uniwersalnych, zapewniających skalowalność metodyki, w BC ciężar koncentracji przeniesiony jest na atrybuty specyficzne. Wynika to w głównej mierze z wielowątkowości i unikatowego charakteru każdego przypadku symulacji. Uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji wymaga zdefiniowania atrybutów i zależności między nimi na rzadko spotykanym w zarządzaniu procesami poziomie drobiazowości. Z jednej strony podejście takie umożliwia uzyskanie oczekiwanego wyniku, z drugiej czyni tak zdefiniowane atrybuty całkowicie bezużytecznymi w jakimkolwiek innym scenariuszu (Chen i in., 2021, s. 2-9).

Ponadto, zbiór atrybutów specyficznych może zawierać się w zbiorze atrybutów uniwersalnych. Innymi słowy ten sam atrybut na wyższym poziomie granulacji może stanowić właściwość unikatową dla danego wdrożenia, a na niższym poziomie granulacji może znaleźć

zastosowanie w wielu innych przypadkach. Dla przykładu, posiadanie opisu, zawierającego miejsce i czas powstania danej jest właściwością uniwersalną dużego zbioru danych, podczas gdy posiadanie opisu w postaci co najmniej pięciu wartości, wśród których wskazane jest nazwisko autora, wysokość obiektu i jego współczynnik smukłości będzie już właściwością specyficzną dla projektu ochrony drzewostanu inteligentnego miasta.

O ile dodawanie atrybutów do danych, opisujących model symulacyjny podnosi zwinnność ich przetwarzania, o tyle nadmiar danych i ich duplikacja spowalnia symulację.

W kontekście przedsiębiorstwa, problem ten odnosi się w szczególności do atrybutów specyficznych dla maszyny, stanowiska roboczego i innych elementów symulowanego procesu, dla których dane, niosące te same informacje, a pochodzące z różnych źródeł, mogą być zduplikowane. Uniknięcie duplikacji przetwarzanych danych wymaga z jednej strony asertywnego wyboru danych generycznych, determinujących strukturę danych dla modelu, a z drugiej strony jasnego zdefiniowania hierarchii i klasyfikacji danych specyficznych. Dotyczy to zarówno atrybutów statycznych, jak i wrażliwych w wymiarze czasowym, takich jak czas do serwisu, czas między przestojami, dostępność, czy odsetek błędnych cykli. Dla przykładu, atrybut odsetka błędnie wykonanych cykli może być specyficzny dla maszyny, dla stanowiska roboczego, jak i dla procesu. Hierarchia redundantnych atrybutów określa w takiej sytuacji kolejność wyboru danych, uwzględnianych w symulacji.

Atrybuty generyczne, ogólne pozwalają prowadzić generyczne symulacje i uzyskiwać wartościowe wyniki o ogólnym charakterze. W przypadku specyficznych problemów, lub pytań, należy predefiniować cel symulacji oraz dostarczyć systemowi danych o atrybutach specyficznych dla danego problemu, bądź obiektów związanych z problemem. Wówczas poprawność modelu powinna być walidowana względem odpowiedzi na wszystkie problemowe pytania.

Uwzględniając potencjalną wielość źródeł danych specyficznych, duplikacja danych dotyczy atrybutów specyficznych częściej niż generycznych. W wyniku testów modeli symulacyjnych odkryto szereg metod na określenie podobieństwa danych reprezentowanych przez atrybuty specyficzne. Zastosowanie tych metod pozwala zdecydować o poprawności wyników w oparciu o zestawienie danych wynikowych z danymi historycznymi fizycznego odpowiednika BC, określając jednocześnie poziom niepewności w odniesieniu do wyników danego modelu. Walidacja modelu odbywa się tu pośrednio w drodze porównania zestawów danych, adresujących wskaźniki celu symulacji. W ten sposób zespół walidujący może ocenić dokładność zachowania modelu (Monostori, Pfeiffer i Popovics, 2016.).

4.3.4 Wpływ atrybutów na wiarygodność bliźniaka cyfrowego

Niepewność można zdefiniować jako stan braku bezspornej, opartej o fakty wiedzy co do słuszności prezentowanego twierdzenia. Zarówno podczas prowadzenia analizy ilościowej, jak i jakościowej może pojawić się potrzeba określenia wyników mimo braku faktów bądź danych w ilości i jakości, wystarczających do wskazania bezspornie prawidłowej wartości (Read, 2009, s.1-2).

W literaturze do najczęściej podawanych czynników niepewności należą:

- a) niepewność przedmiotu odwzorowania: identyfikacyjna (wykrycie i skategoryzowanie obiektu), strukturalna (zdefiniowanie formy obiektu), materiałowa (zdefiniowanie składu i/lub cech fizycznych obiektu). Najczęściej wynika z nieprawidłowej (nieprecyzyjnej, niekompletnej) akwizycji danych – zeskanowania, sfotografowania, opisanie, które było błędne lub oparte o niepełne dane;
- b) niepewność parametrów przedmiotu odwzorowania: wymiary, lokalizacja, ukształtowanie, zachowanie, czynności, czynniki zewnętrzne. Najczęściej wynika z nieprzewidywalnego charakteru niektórych parametrów budowanego modelu, jak np. siła tarcia powierzchni, częstotliwość drgań, kierunki i skala deformacji w czasie, czynniki pogodowe;
- c) niepewność modelu: dotyczy zachowania modelu. Niepewność modelu pojawia się, gdy istnieje możliwość uzyskania niewłaściwego wyniku w sytuacji, gdy dostępne są wszystkie faktyczne wartości parametrów, stosowanych w modelu. Wynika z niedoskonałości przyjętych metod budowania modelu, które mogą być nadmiernie uproszczone względem fizycznego odpowiednika, np. zbyt mała liczba punktów siatki, zbyt mało wektorów każdego z punktów, stosowanie modeli 2D do symulowania obiektów 3D, stosowanie nieadekwatnie uproszczonych modeli 3D, pozbawionych cech wpływających na wynik symulacji (Read, 2009, s.1-2).

W przypadku analiz jakościowych złożonych problemów, których wynik stanowią opisy statystyczne, a nie jednoznacznie wskazane jednostki czy zakresy, zmniejszenie niepewności ma wpływ na podejmowane decyzje, choć zwykle nie zmniejsza ryzyka niepowodzenia. Ma to miejsce np. w przypadku analiz jakościowych ścieżek genetycznych terapii onkologicznych, gdzie głównym źródłem niepewności jest złożoność procesów genetycznych i molekularnych. Uwzględnienie danych ilościowych w jakościowej analizie statystycznej może redukować niepewność lekarza i pacjenta co do wybieranej ścieżki terapii.

Jednak poziom niepewności w kontekście ryzyka niepowodzenia terapii nie ulega w tym przypadku zmianie (Bartley i in., 2020, s. 1450).

Wśród najbardziej znanych metod subiektywnej oceny neutralizowania niepewności wymieniane są: ocena Bayesa, ocena skalibrowana, panel delficki i rachunek prawdopodobieństwa:

- a) W podejściu delfickim oceny dokonuje grupa ekspertów, z których każdy dokonuje indywidualnej oceny opisowej w odpowiedzi na ten sam zestaw informacji, a następnie ocenia opinie kolegów. Pod wpływem opinii kolegów, każdy aktualizuje własną opinię. Proces powtarzany jest do uzyskania stabilnej opinii wspólnej. W razie jej braku, stosuje się średnią grupy;
- b) Ocena skalibrowana wymaga oceny dwóch aspektów, danych oraz oceniających dane. Ta druga z ocen służy identyfikacji znanych uprzedzeń oceniającego przez kolegów w drodze wypełnienia kwestionariusza;
- c) Rachunek prawdopodobieństwa opiera się o bliską współpracę analityka z każdym oceniającym w celu wypracowania pogłębionych spostrzeżeń. Poza tym wątkiem metoda przypomina ocenę skalibrowaną. Metoda milcząco zakłada brak kompetencji oceniającego w zakresie oceny własnej niepewności. Brak mechanizmu na wypracowanie konsensusu;
- d) Prawdopodobieństwo Bayesa jest przydatny, gdy podstawowy mechanizm jest zrozumiały, a dane stanowią reprezentatywną próbkę ocenianego przedmiotu. Stanowi narzędzie porządkujące wykorzystanie nowych informacji do aktualizacji posiadanej wiedzy. Dostarcza wskazówek w jaki sposób wiedzę posiadaną przed eksperymentem należy modyfikować w oparciu o uzyskane wyniki (Read, 2009, s.1-2).

W przypadku symulacyjnych analiz ilościowych, opartych o niepewne dane lub zbiory danych, atrybuty poziomu niepewności danych oraz wyników symulacji są zwykle subiektywne, zależne od kompletności i wiarygodności danych oraz kompetencji osób dokonujących oceny. Używana w takich przypadkach terminologia nie definiuje poziomów w postaci jednoznacznych wskazań liczbowych, lecz określa dla nich zbiory wyników, których interpretacja waha się w węższych bądź szerszych granicach tolerancji. Dla przykładu, do oceny poziomu niepewności przy projektowaniu ukształtowania zbroczy kopalń odkrywkowych przez Australijski Kodeks Raportowania Eksploracji Złóż stosowane są pojęcia poziom 'zmierzony', 'wskazywany', 'wynioskowany' (Read, 2009, s.1-2).

Dodatkowy czynnik niepewności stanowią kompetencje twórców danych i atrybutów. W niektórych przypadkach ilość danych nie przekłada się na podniesienie jakości

modelowania, ponieważ brakuje rzetelnej oceny wiarygodności wprowadzanych danych i atrybutów. Dzieje się tak w przypadku wieloosobowego gromadzenia (z ang.: *crowdsourcing*) danych. Ta rewolucyjna metoda gromadzenia danych wniosła nowe wyzwanie do zarządzania danymi i atrybutami. W odróżnieniu od tradycyjnego procesu tworzenia danych przez ekspertów dziedzinowych, *crowdsourcing* zakłada, że dane może wprowadzić każdy. W przypadku np. projektu OpenStreetMap doprowadziło to do niestabilnej struktury danych, co w konsekwencji negatywnie wpłynęło na jakość działania całego narzędzia (Auer i in., 2019).

Poziom niepewności wyników oceniany jest wg kryteriów, wymienionych w kolejnej sekcji 4.3.5 Pomiar atrybutów i ich analiza.

4.3.5 Pomiar atrybutów i ich analiza

Granice tolerancji atrybutu niepewności danych zależą od charakteru wdrożenia i etapu prac w przedsiębiorstwie. Analiza jakościowa, kierowana subiektywną oceną i intuicją oceniających, jest akceptowalna na wczesnych etapach projektowania i gromadzenia informacji. Na dalszych etapach wymagane jest przeniesienie ciężaru z analizy jakościowej na ilościową, opartą w coraz większym stopniu o niepodważalne, aktualne dane, ich bezsporną ocenę i model wiernie odzwierciedlający rzeczywistość.

Można wyodrębnić pięć poziomów niepewności w odniesieniu do danych i uzyskiwanych dzięki nim wyników symulacji komputerowej. Uwzględniają one poziom subiektywności i intuicyjności oceny oraz wiarygodności i jakości danych. Ocena dokonywana jest w skali od 1 do 5, gdzie 1 oznacza ocenę całkowicie intuicyjną w oparciu o chaotyczne dane, a 5 oznacza ocenę pozbawioną intuicji / wynikającą z matematycznej analizy wysokiej jakości wiarygodnych danych:

- 5 - pewność danych i wyników powyżej 80% - symulacja przeprowadzona w drodze matematycznej analizy bezspornych danych, na precyzyjnych parametrach i wiernym modelu; nie angażuje doświadczenia oceniającego, przekonań czy intuicji;
- 4 - pewność danych i wyników powyżej 60% do 80% – ocena ilościowa w oparciu o uzupełnione aktualne i wiarygodne informacje i dane, które wcześniej oceniono jakościowo; w minimalnym stopniu oparta indywidualne doświadczenie, wiedzę i przekonania;
- 3 - pewność danych i wyników 40% do 60% - ocena w dużym stopniu subiektywna, choć dokonana w oparciu o wiarygodne dane i zweryfikowaną wiedzę, oparta o indywidualne

doświadczenie i przypuszczenia w istotnym stopniu; w przypadku interpretacji przez osoby o wysokich kompetencjach, istnieje niewielkie prawdopodobieństwo znaczących zmian interpretacji wyników symulacji na wyższych poziomach pewności;

- 2 - pewność danych i wyników 20% do 40% – ocena intuicyjna, silnie oparta o dane z podobnych obszarów działania analizowanego przedsiębiorstwa lub innych przedsiębiorstw, bazująca na doświadczeniu i intuicji oceniającego przy niewielkiej dostępności wiarygodnych mierzalnych danych;
- 1 - pewność danych i wyników 20% - ocena bez dostępu do danych bądź dane niewiarygodne; ocena całkowicie intuicyjna (Read, 2009, s.5).

Obiecujące wyniki regresji niepewności dają praktykowane w ostatnim czasie hybrydowe metody, łączące podejścia tradycyjne, jak PFE (z ang.: *Potential Future Exposure*) czy rozkład Gaussa z nowymi niedeterministycznymi metodami, które uwzględniają zmienność i niepewność. Przykładem takiego łączenia metod w zrównoleglony system analizy danych stałych i zmiennych są symulacje rozpoznawania twarzy, gdzie deterministyczny model odpowiada za dokładność odwzorowania rzeczywistości, podczas gdy w tym samym czasie analizowane są w locie zmienne dotyczące zakłóceń w danych obrazowych (Chang i in., 2020).

5. MODEL GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – UJĘCIE TEORETYCZNE

5.1 Model epistemologiczny

Przedstawiona w rozdziałach 2-4 analiza literatury pozwoliła skonstruować model gotowości, stanowiący syntezę dobrych praktyk z różnych obszarów zastosowań modeli gotowości i dojrzałości oraz doświadczeń zawodowych autora ze współpracy z przedsiębiorstwami handlowymi, produkcyjnymi i usługowymi.

Proponowany w rozprawie model gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC, zawierający parametryzację wymiarów gotowości oraz skalę dojrzałości w zakresie zarządzania danymi, stanowi logiczną sekwencję czynności i decyzji, podejmowanych przez przedsiębiorstwo na etapie planowania wdrożenia bliźniaka cyfrowego. Celem przedsiębiorstwa, zakładanym na potrzeby opracowania modelu, jest zmiana stanu gotowości przedsiębiorstwa w obszarze określonym przez przedsiębiorstwo i w stopniu adekwatnym do oczekiwanych korzyści.

Proponowany autorski model RM4DT obejmuje trzy wymiary zmian:

- a) gotowość danych w przedsiębiorstwie,
- b) dojrzałość procesów zarządzania danymi przez przedsiębiorstwo,
- c) gotowość technologii.

Wypadkowa tych trzech składowych, obliczana jest w oparciu o parametry gotowości i prezentowana w postaci wektora zmiany stanu gotowości do wdrożenia BC.

5.2 Model graficzny

Dostępne źródła wskazują na wysoki poziom oczekiwań użytkowników modeli gotowości względem istnienia graficznej reprezentacji modelu i jego procesów (Jia, Wang i Zhang, 2022). Najchętniej przyjmowaną w przedsiębiorstwach postać modeli stanowią mapy procesów lub inne formy reprezentacji graficznej. W jednym z badań zaledwie 3,7% osób, świadomych istnienia modelu zarządzania w przedsiębiorstwie, nie było świadomych istnienia jego formy graficznej (Sliż, 2016).

O ile w małych organizacjach z niewielką liczbą realizowanych procesów i podejmowanych decyzji tworzenie modeli i ich graficznych reprezentacji może wydawać się

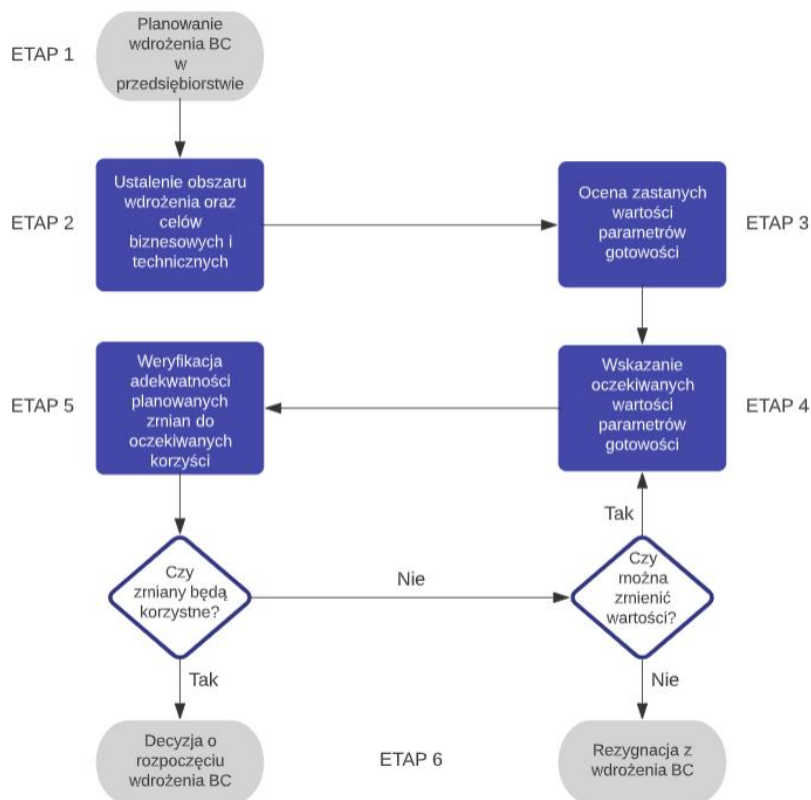
zbędną abstrakcją, o tyle w większych przedsiębiorstwach z setkami równoległych procesów i tysiącami podejmowanych codziennie decyzji, wizualne przedstawienie modelu zarządzania, struktury czy procesów staje się niezbędne. Szczególną wartość, uzyskiwaną podczas opracowania struktury wizualnej reprezentacji modelu, stanowi dekompozycję procesów na elementarne jednostki składowe, z których każda zyskuje swoją graficzną reprezentację (Edeki i Flowers, 2013, s. 37).

Model graficzny gotowości w dysertacji zbudowany jest z dwóch elementów, a) diagramu procesów modelu gotowości, b) wielowymiarowej przestrzeni wektorów zmiany gotowości przedsiębiorstwa.

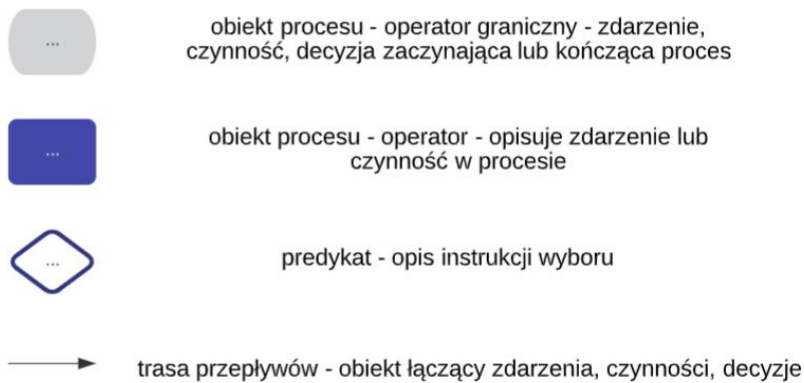
5.2.1 Diagram procesu podejmowania decyzji w modelu zarządzania gotowością

Diagram przebiegu procesu podejmowania decyzji w modelu zarządzania gotowością w dysertacji został opracowany w oparciu o modele procesów zespołu badawczo-rozwojowego korporacji IBM i zawiera cztery kategorie elementów graficznych: obiekty procesu (zdarzenia, czynności, decyzje), obiekty łączące (przepływy czynności, informacji, relacje), trasy przepływów (zbiorniki (bufory), tory przepływów), artefakty (obiekty opisujące, obiekty grupujące, uwagi) (White, 2004, s. 2-6).

Sekwencję podejmowania decyzji i wykonywania wynikających z nich czynności w proponowanym modelu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC, w tym do zarządzania danymi, przedstawiono na Rysunku 5.1.



LEGENDA:



Rys. 5.1. Diagram przebiegu procesu podejmowania decyzji w modelu gotowości RM4DT

Źródło: opracowanie własne

5.2.2 Przestrzeń zmiany stanów gotowości w modelu graficznym RM4DT

Konsekwentne polepszanie wyników przedsiębiorstwa wymaga ciągłego doskonalenia procesów. Aby przedsiębiorstwo mogło zwiększać swoje możliwości poprawiania wyników, powinno mieć jasny obraz ostatecznego celu oraz środki do pomiaru postępów na poszczególnych etapach. Z tego powodu opracowano poziomy modeli dojrzałości (Jaco, 2004).

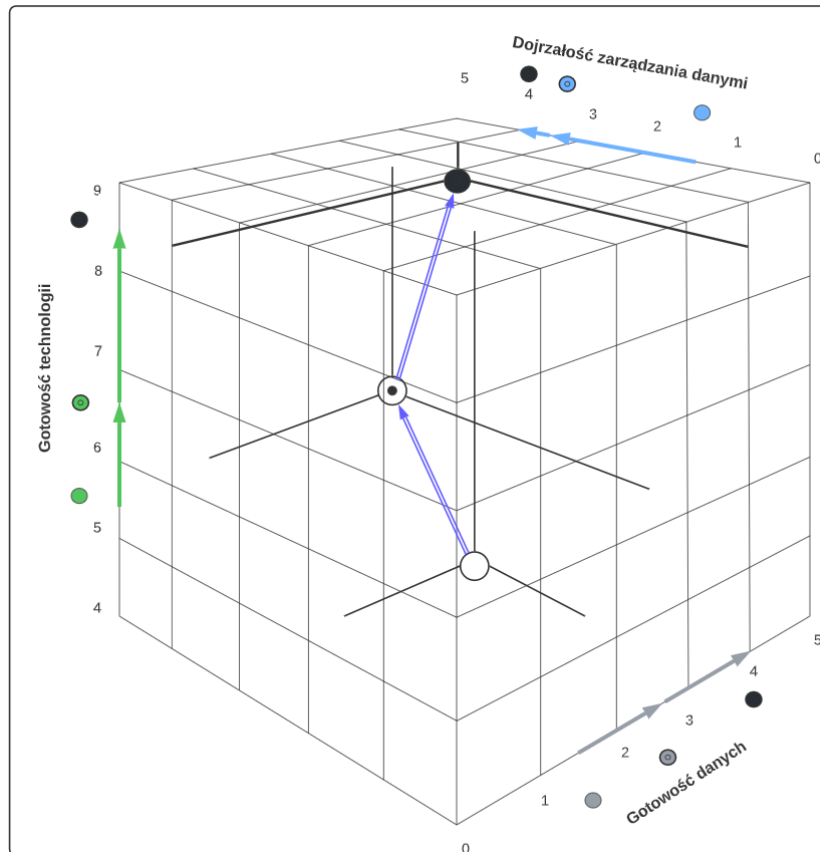
Badania wskazują jednak na nieadekwatność formy dwuwymiarowych, płaszczyznowych modeli do przedstawiania stanu dojrzałości, zdolności, jak i gotowości przedsiębiorstwa podczas wdrażania konkretnego systemu, dla którego znaczenie ma wiele aspektów aktywności (Succar, 2010). Powodem tej sytuacji jest trudność jednoznacznego wskazania odniesień zmiennych do wielu skal wartości, jakie należy uwzględnić przy wdrażaniu konkretnych systemów (Succar, tamże, s. 20). Dodatkowo, w aspekcie terminologii wyzwaniem stanowi brak jasnego rozróżnienia i nieprecyzyjne definiowanie pojęć *zdolności* (do realizacji określonych działań), *dojrzałości* (rozumianej jako poziom doskonałości w realizowaniu określonych działań) i *gotowości* (łączącej istotne dla danego wdrożenia aspekty dojrzałości i zdolności).

Rozwiązaniem stosowanym w takich przypadkach są modele graficzne w postaci przestrzennej, stosowane samodzielnie lub wspólnie z diagramami procesów głównie w analizie zmian i ryzyka, związanych ze zmianami w przedsiębiorstwie, w tym związanymi z zarządzaniem danymi i rozwojem oprogramowania. Podczas gdy modele dojrzałości nie odnoszą się do aspektów technologicznych prowadzonych w przedsiębiorstwie procesów, a poziomy gotowości technologicznej oceniane są uznaniowo i w oderwaniu od planowanych procesów, wielowymiarowy model przestrzenny, umożliwia uwzględnienie szeregu wymiarów technologicznych, organizacyjnych i procesowych oraz uchwycenie zależności pomiędzy ich parametrami. W odróżnieniu od klasycznych modeli dojrzałości, takich jak CMMI, gdzie poziom dojrzałości stanowi wynik analizy, w modelach przestrzennych, jak również w dysertacji, poziom dojrzałości (zarządzania danymi) stanowi informację wejściową, wykorzystywaną do oceny i planowania zmian gotowości do wdrożenia (Adam, 2022).

Model graficzny RM4DT w postaci przestrzennej stanowi narzędzie oceny stanu dojrzałości i gotowości przedsiębiorstwa na reprezentowanych skalach, a także pozwala identyfikować korelacje pomiędzy poziomami dojrzałości (Succar, tamże, s. 65-66). Dzięki przejrzystemu wskazaniu poziomów doskonałości (istniejącego i/lub docelowego), model graficzny RM4DT wspiera personel przedsiębiorstwa w zrozumieniu prezentowanych wartości oraz wpływu przedstawianych zmian na działalność przedsiębiorstwa (Bhujang, 2012, s. 596).

W celu wizualnego przedstawienia zmiany stanu gotowości w modelu RM4DT, jaką przedsiębiorstwo planuje przeprowadzić na potrzeby wdrożenia BC, w dysertacji zaproponowano wielowymiarową przestrzeń zmiany stanu gotowości, tj. model graficzny RM4DT. Przestrzeń ta umożliwia graficzne przedstawienie wektora zmiany stanu gotowości jako wypadkowej wektorów zmian poszczególnych jej wymiarów: gotowości technologii, dojrzałości zarządzania danymi w przedsiębiorstwie i gotowości danych w przedsiębiorstwie. Przykład wielowymiarowej przestrzeni z zaznaczonymi wektorami trzech wymiarów i

wypadkowym wektorem zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC przedstawiono na Rysunku 5.2. Do zilustrowania przestrzeni posłużono się wielowymiarową przestrzenią euklidesową.



LEGENDA:

Przestrzeń euklidesowa stanów gotowości	
	Stan Zero - brak gotowości do wdrożenia BC
	Stan Alfa - gotowość do rozpoczęcia wdrożenia BC
	Stan Beta - gotowość przedsiębiorstwa do doskonalenia w oparciu o BC
	Wektor zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC
	Wektor zmiany poziomej gotowości technologii
	Wektor zmiany poziomej dojrzałości zarządzania danymi
	Wektor zmiany poziomej gotowości danych

Rys. 5.2. Przykładowa przestrzeń zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa w modelu graficznym

RM4DT

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 5.2 przedstawia wektory zmiany stanu gotowości przykładowego przedsiębiorstwa, planującego wdrożenie BC. Wektory zostały zaprezentowane w wielowymiarowej przestrzeni euklidesowej, w której każdy z punktów jest wyrażony przez trzy współrzędne:

- a) Poziom gotowości technologii poziomy od 0 do 5,
- b) Poziom dojrzałości zarządzania danymi poziomy od 0 do 5,
- c) Poziom gotowości danych poziomy od 0 do 5.

Przedsiębiorstwo na przykładzie, przedstawionym na Rysunku 5.2, planuje dzięki wdrożeniu BC osiągnąć stan gotowości do doskonalenia, tj. stan po wdrożeniu BC, którego osiągnięcie w przypadku tego przykładowego przedsiębiorstwa wymaga zmian w poszczególnych wymiarach w następujących stopniach:

- a) Gotowość technologii – wektor zielony: +3;
- b) Dojrzałość zarządzania danymi – wektor niebieski: +2,5;
- c) Gotowość danych – wektor szary: +2,5.

Wartość wektora fioletowego, tj. wektora zmiany stanu gotowości, obliczana jest wg wzoru, przedstawionego w sekcji ‘Model formalny’ niniejszego rozdziału.

5.3 Model formalny

Model formalny RM4DT stanowi matematyczno-logiczną reprezentację modelu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC (Bilanova i in., 2021), proponowanego w dysertacji wraz z szeregiem definicji pojęć i symboli, używanych w modelu. Model formalny w dysertacji został opracowany w oparciu o teorię relacyjnych baz danych, których wykorzystanie, w odróżnieniu od korzystania z baz prostych, cechuje możliwość współpracy zbiorów danych, przedstawianych w postaci tablic (Jurkiewicz, 2013).

Model formalny służy ustrukturyzowaniu relacji wymiarów, parametrów i stanów gotowości modelu w postaci liczbowej oraz umożliwia matematyczne przedstawienie adekwatności i efektywności planowanych przez przedsiębiorstwo zmian w odniesieniu do oczekiwanych korzyści. Na potrzeby modelu formalnego, elementy semantyczne, podlegające analizie logiczno-matematycznej, przedstawiono w postaci literowej, bądź literowo-liczbowej.

W oparciu o analizę literatury i konsultacje eksperckie, zdefiniowano szereg elementów modelu formalnego, które podzielono na grupy, zdefiniowano i rozpisano w formie relacyjnych tabel danych jeden-do-wielu (Codd, 2007).

Definicja 1

Gotowość - stan gotowości (G) przedsiębiorstwa w zakresie jego zdolności do rozpoczęcia i przeprowadzenia wdrożenia BC, którego liczbowa reprezentacja stanowi wypadkową trzech wymiarów składowych: gotowości technologii, dojrzałości zarządzania danymi przez przedsiębiorstwo i gotowości danych. Poziomy gotowości przedstawia Tabela 5.1.

Tab. 5.1. Tabela poziomów gotowości do wdrożenia BC

Oznaczenie	Opis poziomu gotowości
G0:	nieobecna , całkowity brak aktywności w przedsiębiorstwie w zakresie gotowości
G1:	chaotyczna , aktywność w przedsiębiorstwie pojawia się przypadkowo i nie przynosi korzystnych efektów, brak dokumentacji i kontroli nad procesami, technologie pojawiają się jedynie do realizacji doraźnych zadań i są rozproszone, nie odzwierciedlają elementów świata fizycznego
G2:	reaktywna , aktywność doraźna, w odpowiedzi na pojawiające się problemy, efekty są szczątkowe, choć czasami pozytywne; procesy istnieją w głowach pracowników i nie są dobrze zorganizowane; niektóre elementy fizycznych obiektów lub procesów są odzwierciedlane przez wykorzystywane technologie
G3:	stabilna , aktywność w tym zakresie daje stale korzystne efekty, jednak istnieje dużo przestrzeni do poprawy wydajności i skuteczności działań w tym zakresie; procesy są nazwane i opisane; technologie odzwierciedlają w przestrzeni wirtualnej wybrane obiekty i procesy oraz są zintegrowane wertykalnie dla wybranych procesów w oparciu o jednolite standardy semantyczne i oznaczenia danych
G4:	prognostyczna , stan gotowości na tyle wysoki, że nowy pracownik z łatwością rozumie i stosuje związane z nim procesy, wyniki są zazwyczaj korzystne i mierzone w sposób, umożliwiający porównanie ich rok do roku oraz identyfikację miejsc do poprawy; technologie są zintegrowane wertykalnie i horyzontalnie w całym przedsiębiorstwie, a obiekty lub procesy znajdują odzwierciedlenie w narzędziach typu AI, ML, big data
G5:	zautomatyzowana , stan najwyższej gotowości, jaki przedsiębiorstwo może osiągnąć w zakresie opisanego parametru, zarządzanie procesami jest zautomatyzowane i bez zwłoki udoskonalane w trybie bieżącym; zintegrowane technologie i dane są ustandaryzowane na przestrzeni całego łańcucha wartości przedsiębiorstwa i są zdolne do samoadaptacji oraz samodzielnej optymalizacji

Źródło: opracowanie własne

Definicja 2

Wymiar gotowości - element konstrukcji modelu gotowości najwyższego poziomu, grupujący parametry gotowości w jedną grupę danego wymiaru; Model RM4DT zawiera trzy wymiary, z których każdy zawiera po kilka parametrów gotowości. Wymiarom gotowości nadano oznaczenia literowe, które przedstawiono w postaci relacyjnej bazy danych w Tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Tabela wymiarów gotowości

Oznaczenie	Opis
GA:	gotowość technologii
GB:	dojrzałość procesów zarządzania danymi przez przedsiębiorstwo
GC:	gotowość danych w przedsiębiorstwie

Źródło: opracowanie własne

Definicja 3

Parametr gotowości - najmniejszy element konstrukcji modelu gotowości, służący liczbowemu wyrażeniu przez przedsiębiorstwo stanu gotowości; rodzicem parametru jest wymiar. Parametrom gotowości nadano oznaczenia literowo liczbowe, zaczynające się od litery P (parametr), np. PA1 – parametr nr1 w ramach wymiaru A, PA2 – parametr nr2 w ramach wymiaru A, PB2 – parametr nr2 w ramach wymiaru B, itd. Zestawienie wszystkich parametrów (P) gotowości (G) w wymiarach GA, GB, GC przedstawiono w tabelach 5.3, 5.4, 5.5.

Tab. 5.3. Tabela parametrów (PA) gotowości technologii

Oznaczenie	Opis
PA1:	zdolność do generowania nadwyżki finansowej netto dla przedsiębiorstwa, dzięki zwiększaniu wydajności wykorzystania wewnętrznych i zewnętrznych narzędzi i zasobów cyfrowych.
PA2:	wydajność wykorzystania narzędzi i zasobów cyfrowych do zarządzania organizacją, procesami i zespołami.
PA3:	stały wzrost skali i jakości innowacji i eksperymentów w przedsiębiorstwie, prowadzonych przy użyciu narzędzi cyfrowych.
PA4:	skuteczność zarządzania zmianą i transformacją cyfrową w celu zapewnienia osiągnięcia wzrostu wydajności i wyników.
PA5:	skuteczność analizy rynku i zdolność wczesnego identyfikowania trendów , oczekiwań klientów za pomocą technik cyfrowych.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 5.4. Tabela parametrów (PB) dojrzałości procesów zarządzania danymi

Oznaczenie	Opis
PB1:	Zdolność działu IT do mobilizowania zasobów danych dla celów dowolnego zespołu, użytkownika lub potrzeby biznesowej, np. projektowania produktu.
PB2:	Skuteczność w zakresie ochrony zasobów cyfrowych, danych i informacji własnych oraz partnerów i klientów.
PB3:	Zdolność oceny w oparciu o dane poziomu świadomości produktów i usług przedsiębiorstwa na docelowych rynkach i platformach cyfrowych.
PB4:	Przejrzystość i elastyczność informacji finansowych w całym przedsiębiorstwie dzięki cyfrowemu dostępowi do silnych, niezawodnych, aktualnych i użytecznych danych.
PB5:	Zdolność zdobywania, zabezpieczania i wykorzystywania danych i informacji o klientach w celu zwiększenia wartości produktów.
PB6:	Zdolność przedsiębiorstwa do pozyskiwania i zarządzania danymi , przydatnymi w planowaniu i realizacji strategii.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 5.5. Tabela parametrów (PC) gotowości danych w przedsiębiorstwie

Oznaczenie	Opis
PC1:	Kompletność i spójność – czy wszystkie opisy danych są spójnie oraz zawierają wszystkie przydatne w planowanym wdrożeniu tagi i atrybuty?
PC2:	Interoperacyjność – czy formaty i semantyka danych są interoperacyjne z popularnymi w przedsiębiorstwie i/lub poza nią systemami i standardami?
PC3:	Gęstość / intensywność – czy ilość danych, generowanych na jednostkę czasu, przestrzeni, mocy jest ponadprzeciętna względem stanu techniki?
PC4:	Dostępność / wykrywalność – czy dane są w pełni dostępne, a ich opisy bądź atrybuty umożliwiają ich zwinne wyszukiwanie?
PC5:	Aktualność / częstotliwość – czy dane są dostępne w czasie zbliżonym do rzeczywistego
PC6:	Wiarygodność – czy wszystkie dane są opisane w sposób wiarygodny i poprawny?
PC7:	Ilość – czy ilość danych w wymiarze czasowym, przestrzennym, rodzajów zdarzeń jest wystarczająca dla planowanego wdrożenia?

Źródło: opracowanie własne

Definicja 4

Adekwatność (A) - współczynnik zależności zmian planowanych w ramach poszczególnych wymiarów gotowości względem zakładanego efektu w postaci zmiany gotowości (Gz). Obliczeniu wartości adekwatności (A) służy wzór (1) na wartość współczynnika Adekwatności (A). Współczynnik A obliczany jest w oparciu o wartości Gz, GAz, GBz, GCz (równanie 2):

$$A = 1/3 \times (GAz + GBz + GCz) / Gz \quad (2)$$

gdzie każda z wartości Gz, GAz, GBz, GCz mieści się w przedziale (0; 5).

Wyliczana wg wzoru (1) adekwatność (A) nakładów wdrożenia do oczekiwanych korzyści stanowi iloraz trzeciej części sumy wartości nakładów (GAz, GBz, GCz) i wartości korzyści (Gz). Znaczenie wartości współczynnika adekwatności dla przedsiębiorstwa można odczytać z Tabeli nr 5.6.

Tab. 5.6. Tabela Adekwatności (A) nakładów planowanego wdrożenia do oczekiwanych korzyści

Oznaczenie	Opis
$A \leq 1$:	racjonalne, odpowiednie planowanie parametrów wdrożenia w zakresie poszczególnych wymiarów gotowości (GA, GB, GC) względem oczekiwanej zmiany stanu gotowości cyfrowej (Gz)
$A > 1$:	nieracjonalne, nadmierna planowana zmiana w wymiarze gotowości technologii (GAz) i/lub zarządzania danymi (GBz) i/lub gotowości technologii (GCz) względem oczekiwanej zmiany stanu gotowości cyfrowej (Gz)

Źródło: opracowanie własne

Definicja 5

Efektywność (E) - współczynnik zależności nakładów do korzyści planowanych przez przedsiębiorstwo w związku z wdrożeniem BC. Obliczeniu Efektywności (E) wdrożenia służy wzór (2), gdzie stosunek nakładów planowanych na podwyższenie stanu gotowości w wymiarach technologii (GAz), procesów zarządzania danymi (GBz) oraz gotowości danych (GCz) do oczekiwanych korzyści, tj. wzrostu stanu gotowości (Gz) stanowi Efektywność (E) zmiany planowanej w związku z wdrożeniem. Poziomy efektywności przedstawia Tabela 5.7. Aby obliczyć efektywność (E) transformacji, należy podzielić zmianę gotowości (Gz) przez adekwatność (A) (równanie 3):

$$E = Gz / A \quad (3)$$

Tab. 5.7. Poziomy efektywności (E) wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Oznaczenie	Opis
E < 1:	wdrożenie nieefektywne , na akceptowalnym poziomie ryzyka
E (1; <2):	na granicy efektywności , na akceptowalnym poziomie ryzyka
E (2; <3):	przeciętnie efektywne , na akceptowalnym poziomie ryzyka
E (3; <4):	dość efektywne , na akceptowalnym poziomie ryzyka
E (4; <5):	efektywne , podwyższony poziom ryzyka
E (5):	bardzo efektywne , podwyższony poziom ryzyka
E > 5:	nadzwyczaj efektywne , podwyższony poziom ryzyka

Źródło: opracowanie własne

Definicja 6

Ryzyko (R) - szacowany poziom niepewności powodzenia inwestycji, polegającej na przeprowadzeniu wdrożenia BC

Tab. 5.8. Tabela ryzyka niepowodzenia wdrożenia BC

Oznaczenie	Opis
RB	E (0; <4), wdrożenie na akceptowalnym poziomie ryzyka
RN	E (4; >4) wdrożenie o podwyższonym poziomie ryzyka

Źródło: opracowanie własne

Definicja 7

Zmiana (z) wartość planowanej zmiany w wymiarze gotowości. Zmianom stanów w wymiarach gotowości nadano oznaczenia literowe:

- Gz – zmiana gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC,
- GAz – zmiana gotowości technologii,
- GBz – zmiana dojrzałości zarządzania danymi,
- GCz – zmiana gotowości danych.

Obliczeniu wartości planowanej zmiany (z) służy wzór nr 4. Wartości parametrów w wymiarach GA, GB, GC uzyskuje się od przedsiębiorstwa wg sekwencji czynności, opisanej w sekcji ‘Model decyzyjny’ niniejszego rozdziału. Sekwencja modelu decyzyjnego generuje dla każdego z parametrów dwie wartości, wartość X (wartość aktualna parametru) oraz Y (wartość oczekiwana parametru).

Wartość zmiany każdego z parametrów (P_z) stanowi różnica wartości Y i X , obliczana wg wzoru (równanie 4):

$$P_z = P_y - P_x \quad (4)$$

Obliczeniu wartości zmian w poszczególnych wymiarach gotowości oraz parametrów poszczególnych wymiarów gotowości GA_z , GB_z , GC_z służą wzory od 5 do 8. Wartości zmian parametrów (P_z), uzyskane od przedsiębiorstwa dla każdego z wymiarów, należy zsumować i wyliczyć z nich średnie arytmetyczne, posługując się następującymi wzorami (równania 5, 6, 7, 8):

$$GA_z = PA_{1z} + PA_{2z} + \dots + PA_{7z} / 7 \quad (5)$$

$$GB_z = PB_{1z} + PB_{2z} + \dots + PB_{7z} / 7 \quad (6)$$

$$GC_z = PC_{1z} + PC_{2z} + \dots + PC_{7z} / 7 \quad (7)$$

$$G_z = PG_1 + PG_2 + \dots + PG_6 / 6 \quad (8)$$

W celu oceny ryzyka (R) niepowodzenia wdrożenia przyjęto założenie, że wzrost efektywności wdrożenia, rozumiany jako wzrost uzyskiwanych korzyści względem ponoszonych nakładów, jest wprost proporcjonalny do wzrostu ryzyka niepowodzenia. Stąd, przyjęto skalę ryzyka, przedstawioną w Tabeli 4.8, w której ryzyko niepowodzenia wzrasta proporcjonalnie do wzrostu efektywności (E) wdrożenia. Zależność tę przedstawia Tabela 4.7.

5.4 Model decyzyjny

Model decyzyjny został opracowany przy założeniu, że jedynym podmiotem, podejmującym czynności i decyzje w ramach proponowanego w rozprawie modelu decyzyjnego jest przedsiębiorstwo. Problemy decyzyjne przedsiębiorstwa, w których rozwiązaniu pomaga proponowany model to:

- a) czy przedsiębiorstwo jest gotowe na wdrożenie BC?
- b) w jakich wymiarach gotowości i w jakim stopniu przedsiębiorstwo powinno dokonać zmian przed podjęciem wdrożenia BC?
- c) w jakim stopniu przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić zmiany w każdym z wymiarów gotowości, aby wdrożenie BC było adekwatne do potencjalnych korzyści?

- d) w jakim stopniu przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić zmiany w każdym z wymiarów gotowości, aby wdrożenie BC było efektywne?
- e) w jakim stopniu przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić zmiany w każdym z wymiarów gotowości, aby wdrożenie BC było obciążone jak najmniejszym ryzykiem niepowodzenia?

Dzięki liczbowo wyrażonym parametrom oceny, model decyzyjny wskazuje zbiór decyzji poddanych optymalizacji, który wyznaczany jest indywidualnie dla każdego przedsiębiorstwa w oparciu o informacje uzyskane w pierwszych krokach korzystania z modelu. Złożoność procesów w przedsiębiorstwie może wymagać podjęcia decyzji nieoptymalnych z perspektywy modelu, a determinowanych przez czynniki zewnętrzne. Dlatego model dopuszcza możliwość podjęcia przez menadżera przedsiębiorstwa decyzji nieoptymalnej, wskazując na konsekwencje i ryzyka związane z podjęciem takiej decyzji. Decyzje sprzeczne z rekomendacjami stanowią zbiór decyzji dopuszczalnych. Decyzje i wynikające z nich czynności menadżer przedsiębiorstwa podejmuje w oparciu o szereg parametrów, zdefiniowanych i opisanych osobno dla każdego z parametrów gotowości. Wymiary, i parametry modelu zostały zdefiniowane w oparciu o analizę literatury oraz wywiady eksperckie i sesje synektyczne.

W celu wsparcia podejmowania decyzji o wdrożeniu BC, a także w celu podniesienia trafności wyboru zakresu i skali planowanego wdrożenia, dla przedsiębiorstwa opracowano narzędzia w postaci formularzy oceny gotowości, wspierających realizację poszczególnych kroków. Formularz oceny parametrów gotowości danych, dojrzałości zarządzania danymi i gotowości technologii przedstawia Załącznik 01, a formularz oceny gotowości cyfrowej przedsiębiorstwa przedstawia Załącznik 02.

Różnica pomiędzy wartością stanu oczekiwanego (Y) a wartością stanu aktualnego (X) określa wartość planowanej zmiany stanu gotowości. Średnia arytmetyczna różnic ($Y - X$) wszystkich parametrów wskazuje planowany stopień zmiany gotowości (GAz). Skalę wpływu zmiany stanu gotowości na przedsiębiorstwo przedstawia Tabela 5.9.

Tab. 5.9. Skala wpływu zmiany stanu gotowości na przedsiębiorstwo

Skala wpływu zmiany stanu gotowości na przedsiębiorstwo				
1 – niewielki wpływ na funkcjonowanie wybranego obszaru aktywności	2 – niewielki wpływ na funkcjonowanie całego przedsiębiorstwa	3 – zmiana wpływająca znacząco na funkcjonowanie wybranego obszaru	4 – zmiana wpływająca na działanie całego przedsiębiorstwa	5 - zmiana przełomowa dla funkcjonowania przedsiębiorstwa

Zródło: opracowanie własne

Sekwencję czynności, podejmowanych przez przedsiębiorstwo w celu oceny adekwatności i efektywności wdrożenia BC, przedstawiono w sposób graficzny w sekcji ‘Model graficzny’ niniejszego rozdziału. Sekwencja ta jest następująca:

1. Ustalenie celów biznesowych oraz technicznych:
 - Opisanie biznesowego celu wdrożenia BC;
 - Opisanie technicznych celów wdrożenia ze szczególnym uwzględnieniem danych cyfrowych i procesów zarządzania danymi.
 2. Identyfikacja i analiza danych:
 - Określenie czy dane, przydatne do wdrożenia BC istnieją, w jakiej formie, w jakiej ilości, w jakich miejscach oraz jakie działy przedsiębiorstwa będą zaangażowane we wdrożenie BC.
 3. Ocena aktualnych wartości parametrów poziomów dojrzałości:
 - Samoocena stanów gotowości w zakresie zdefiniowanych parametrów gotowości (punktacja od 0-5): dojrzałość danych, dojrzałość procesów zarządzania danymi, dojrzałość przedsiębiorstwa.
 4. Wskazanie oczekiwanych wartości parametrów gotowości:
 - Wyznaczany na tym etapie poziom aspiracji określa docelowy poziom, jaki przedsiębiorstwo planuje osiągnąć w ramach każdego z wymiarów gotowości.
 5. Weryfikacja adekwatności (A) planowanych zmian do oczekiwanych korzyści:
 - Jeśli wartość $A \leq 3$, przystąpienie do wdrożenia;
 - Jeśli wartość $A > 3$, powrót do punktu 4.
 6. Ocena efektywności i ryzyka planowanego wdrożenia:
 - Obliczenie efektywności wdrożenia wg wzoru, podanego w sekcji ‘Model formalny’ niniejszego rozdziału;
 - Oszacowanie ryzyka w oparciu o założenie proporcjonalności;
 - Ocena poziomu niepewności wdrożenia w oparciu o systemy szare - kalkulowane jest ryzyko niepowodzenia w odniesieniu do planowanych zmian dla każdego z parametrów dojrzałości, jak i dla całego przedsięwzięcia.
- Pośrednio, model umożliwia ocenę ryzyka niepowodzenia wdrożenia.
7. Decyzja o wdrożeniu bliźniaka cyfrowego.

6. MODEL GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BC – UJĘCIE PRAKTYCZNE

6.1 Praktyczne zastosowanie modelu RM4DT

Walidacja modelu RM4DT polegała na ocenie gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego w trzech przedsiębiorstwach. Selekcję przedsiębiorstw przeprowadzono w oparciu o następujące kryteria włączenia:

- a) przedsiębiorstwo planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego,
- b) przedsiębiorstwo można jednoznacznie sklasyfikować jako handlowe, usługowe, bądź produkcyjne,
- c) przedsiębiorstwo jest aktywne w jasno określonych segmentach rynku.

Badaniem objęto trzy przedsiębiorstwa, po jednym z sektorów handlu, usług i produkcji. Takie spektrum przedsiębiorstw pozwoliło zweryfikować poprawność samego modelu, jak i jego uniwersalny charakter. W każdym z przedsiębiorstw badanie przeprowadzono w pięciu krokach, przedstawionych na Rysunku 6.1.



Rys. 6.1 Proces badania przeprowadzonego w przedsiębiorstwach usługowym, handlowym i produkcyjnym

Źródło: Opracowanie własne

Celem sesji grup synektycznych była walidacja i uzupełnienie pojęć, wymiarów i parametrów dotyczących gotowości przedsiębiorstw z perspektywy przedsiębiorstw. Celem użycia formularza oceny oraz wywiadu była weryfikacja założeń dotyczących utylitarnego celu wykorzystania modelu gotowości oraz doprecyzowanie zasobów cyfrowych, sprzyjających transformacji cyfrowej.

W ramach badań przeprowadzono walidację modelu RM4DT w warunkach rzeczywistych, obejmującą zastosowanie modelu RM4DT w zarządzaniu przedsiębiorstwami z trzech różnych sektorów:

- a) Studium przypadku A - przedsiębiorstwo usługowe,
- b) Studium przypadku B - przedsiębiorstwo handlowe,
- c) Studium przypadku C – przedsiębiorstwo produkcyjne.

6.1.1 Zastosowanie modelu RM4DT - przykład przedsiębiorstwa usługowego

6.1.1.1 Charakterystyka obiektu badań

Do udziału w badaniu pozyskano przedsiębiorstwo usługowe z branży medycznej – klinikę prywatną. Głównym obszarem działalności przedsiębiorstwa są usługi medyczne w zakresie badań i terapii onkologicznych i gastrologicznych oraz badań radiologicznych. Uczestniczące w badaniu przedsiębiorstwo zatrudnia 7 osób i osiąga obroty poniżej dwóch milionów euro rocznie. Charakterystykę przedsiębiorstwa przedstawia Tabela 6.1.

Tab. 6.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa usługowego uczestniczącego w badaniu

Charakterystyka przedsiębiorstwa	
Rodzaj działalności	usługi
Branża	medyczna
Wielkość zatrudnienia (liczba pracowników)	0-9
Przychody roczne netto	do 2 mln euro
Czy planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego	TAK

Źródło: Opracowanie własne.

6.1.1.2 Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przedsiębiorstwo planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego w celu podniesienia wydajności analizy i opisu obrazów i nagrań radiologicznych, ich opisów oraz rekomendowanych terapii ze szczególnym uwzględnieniem terapii onkologicznych odcinka piersiowego tułowia. Wśród szczegółowych celów przedsiębiorstwa znajdują się przyspieszenie świadczenia usług, wprowadzenie robotów automatyzujących wybrane procesy, wzrost sprzedaży usług, zmniejszenie liczby błędów wynikających ze zmęczenia osób realizujących usługi oraz zmniejszenie czasu bezczynności urządzeń radiologicznych. Przedsiębiorstwo dysponuje znaczącą bazą historycznych danych obrazowych, rozproszonych na maszynach lokalnych oraz serwerach. Przedmiot planowanego wdrożenia wraz z listą celów przedstawia Tabela 6.2.

Tab. 6.2. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie usługowym

Przedmiot planowanego wdrożenia BC	
Główny cel	a) podniesienie wydajności świadczenia usług / produkcji
Dodatkowe cele	b) przyspieszenie / podniesienie wydajności produkcji lub świadczenia usług c) kobotyzacja – wprowadzenie robotów współpracujących z operatorami ludzkimi d) zwiększenie sprzedaży e) podniesienie kompetencji cyfrowych w celu eliminacji błędów ludzkich w procesie zarządzania i obsługi danych f) automatyzacja – skrócenie czasu cykli, wykonywanych przez operatorów ludzkich g) minimalizacja liczby i czasu nieplanowanych przestoju na wybranych stanowiskach roboczych
Istniejące zbiory danych przydatne przy wdrożeniu	bazy danych badań radiologicznych: opisane obrazy przypadków zdrowych i patogennych, głównie onkologicznych odcinka piersiowego, z rezonansu magnetycznego oraz tomografu komputerowego
Miejsce przechowywania danych	serwery zewnętrzne, lokalne stacje robocze
Czy przetwarzanie danych daje pozytywne efekty?	Dane są przetwarzane, lecz nie daje to pozytywnych efektów w odniesieniu do głównego celu wdrożenia.
Działy zaangażowane we wdrożenie BC	teleradiologia

Źródło: opracowanie własne

6.1.1.3 Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przeprowadzona ocena stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC wykazała bardzo niski poziom gotowości technologii oraz dojrzałości zarządzania danymi (w okolicach poziomu 1). Nieco lepsze (w okolicach poziomu 3) wyniki przedsiębiorstwo uzyskało w zakresie gotowości danych. Dokładna ocena zastanego i docelowego stanów gotowości została przedstawiona w Tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Ocena gotowości przedsiębiorstwa usługowego do wdrożenia BC

OCENA STANU GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BLIŻNIAKA CYFROWEGO						
Parametr	Opis parametru	Stan gotowości				
		0	1	2	3	4
Parametry wymiaru A	Gotowość technologii w przedsiębiorstwie					
PA1	Użyteczność i intuicyjność: działanie technologii jest zrozumiałe, użyteczne i intuicyjne dla wszystkich grup użytkowników; regularnie prowadzone są testy w tym zakresie w przedsiębiorstwie oraz wśród partnerów i klientów.		x			y
PA2	Wierność odzwierciedlenia: jak intensywne i regularne są prace przedsiębiorstwa nad podnoszeniem poziomu dokładności i trafności wirtualnego odzwierciedlenia rzeczywistych obiektów i/lub procesów przez technologie.	x				y
PA3	Zewnętrzne narzędzia i dane: jakim poziomem zdolności do korzystania z zewnętrznych narzędzi oraz zasobów cyfrowych (np. danych technicznych, czy finansowych) dysponuje przedsiębiorstwo dzięki technologiom.			x		y
PA4	Autoanaliza: zdolność technologii do rozpoznawania wzorców oraz wczesnego identyfikowania błędów, anomalii, odchyleń od domyślnych procedur oraz rekomendowania i automatycznego wdrażania usprawnień.		x			y
PA5	Angażowanie partnerów/klientów: w jakim stopniu technologie przedsiębiorstwa są wykorzystywane przez partnerów biznesowych i/lub w jakim stopniu przedsiębiorstwo pozyskuje/korzysta z danych cyfrowych pochodzących od partnerów/klientów.				x	y
PA6	Integralność: wszystkie komponenty technologii są sprawne, wykorzystywane i w pełni zintegrowane między sobą, jak i ze stale poszerzanym zakresem źródeł danych w przedsiębiorstwie i poza nim, pracują w oparciu o ujednolicone standardy.		x			y
PA7	Adaptacyjność: technologie w przedsiębiorstwie rozwiązują nowe zadania zgodnie z przeznaczeniem i funkcjami	x			y	

	technologii, również w przypadku konfrontacji z nowym problemem, wątkiem lub kontekstem.						
Parametry wymiaru B	Dojrzałość zarządzania danymi						
PB1	Pozyskiwanie i zarządzanie: zdolność pozyskiwania i/lub generowania niezawodnych, aktualnych i użytecznych danych cyfrowych.			x			y
PB2	Analizowanie rynku i trendy: zdolność obserwowania trendów zmian potrzeb i oczekiwań kluczowych grup klientów przedsiębiorstwa oraz reagowania na te zmiany w oparciu o dane dotyczące konkurencji oraz opinii klientów i partnerów przedsiębiorstwa w odniesieniu do produktów/usług.	x	y				
PB3	Obsługa nowych zastosowań i skuteczność: zdolność i skuteczność działu IT przedsiębiorstwa w mobilizowaniu danych cyfrowych dla nowego specyficznego celu dowolnego zespołu, użytkownika lub potrzeby biznesowej, np. w celu opracowania nowej wersji produktu, weryfikacji opłacalności usługi, modyfikacji stanowiska pracy, itd.	x		y			
PB4	Podejmowanie decyzji i wiarygodność: zdolność szybkiego i elastycznego opisywania, segregowania i redukcji danych oraz do podejmowania decyzji w oparciu o wiarygodne dane.			x			y
PB5	Zabezpieczanie i etyka: zdolność zabezpieczania i etycznego wykorzystywania danych cyfrowych, w tym danych o klientach i ich preferencjach w celu zwiększania wartości dodanej produktów/usług.					x	y
PB6	Rozwój innowacji i eksperymenty: zdolność przedsiębiorstwa do rozwoju innowacji poprzez prowadzenie eksperymentów przy użyciu narzędzi i danych cyfrowych.		x				y
PB7	Włączenie cyfrowe i kultura organizacji: na ile zrozumiała i powszechna wśród pracowników i partnerów przedsiębiorstwa jest wiedza o danych cyfrowych, sposobie ich wykorzystywania oraz wpływie na rozwój przedsiębiorstwa i pracowników.			x			y
Parametry wymiaru C	Dane cyfrowe						
PC1	Kompletność i spójność: w jakim stopniu opisy danych są spójnie oraz zawierają wszystkie przydatne w planowanym wdrożeniu tagi i atrybuty.		x				y
PC2	Interoperacyjność: w jakim stopniu formaty i semantyka danych są interoperacyjne z popularnymi w przedsiębiorstwie i/lub wśród partnerów/klientów systemami i standardami.		x				y
PC3	Gęstość / intensywność: w jakim stopniu ilość danych, generowanych na jednostkę czasu, przestrzeni, mocy zaspokaja potrzeby planowanego wdrożenia i/lub wykracza ponad ilości powszechne w podobnych zastosowaniach.			x			y

PC4	Dostępność / wykrywalność: w jakim stopniu dane są dostępne, a opisy bądź atrybuty danych umożliwiają ich zwinne wyszukiwanie.				x		y
PC5	Aktualność / częstotliwość: w jakim stopniu działania przedsiębiorstwa zapewniają dostęp do danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego.				x		y
PC6	Wiarygodność danych: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia, że wszystkie dane są opisane w sposób wiarygodny i poprawny.					x	y
PC7	Prywatność: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia neutralność danych pod względem zabezpieczenia prywatności i ochrony danych osobowych, np. poprzez anonimizację, bądź pseudonimizację.					x	y

Źródło: Opracowanie własne.

Wskazane w drodze oceny gotowości przedsiębiorstwa parametry pozwoliły skwantyfikować stany gotowości zastany i docelowy, a także wskazać rekomendowane zmiany, jakich przedsiębiorstwo powinno dokonać w każdym z trzech wymiarów, aby osiągnąć stan gotowości do uruchomienia BC.

6.1.1.4 Wytyczenie wektora zmian

W wyniku przeprowadzonej oceny stanów gotowości uzyskano liczbowe wartości parametrów wymiarów gotowości, jak również wartości różnic pomiędzy stanami docelowymi a zastanymi. Następnie, wyliczone wartości posłużyły obliczeniu wektora zmian, wymaganych przed uruchomieniem wdrożenia BC. W przypadku badanego przedsiębiorstwa usługowego, wymagane zmiany w każdym z wymiarów wahały się w granicach od 0,5 do 1,5 punkta. Konieczność przeprowadzenia zmian, tj. aktywności przygotowujących badane przedsiębiorstwo usługowe do uruchomienia wdrożenia BC, wynikała z niskiego zastanego poziomu gotowości oraz dużych oczekiwań odnośnie rezultatów wdrożenia BC. Przeprowadzone w celu wytyczenia wektora zmian obliczenia wraz z rekomendacjami ich wartości i kierunku przedstawiono w Tabeli 6.4.

Tab. 6.4. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym

Model formalny RM4DT			
Tabela zmiany stanów gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC			
Zmiany stanów gotowości w wymiarach A, B, C	Wartości planowanych zmian w wymiarze	Wartości planowanych zmian w wymiarze dojrzałości	Wartości planowanych zmian w wymiarze gotowości danych (C)

	gotowości technologii (A)	zarządzania danymi (B)	
Obliczenie wielkości rekomendowanych zmian w wymiarach A, B, C	$GA_x = 8/7 = 1$ $GA_y = 32/7 = 4,5$ $GA_v = 4,5 - 2 = 2,5$ $GA_v - GA_x = 1,5$	$GB_x = 11/7 = 1,5$ $GB_y = 28/7 = 4$ $GB_v = 4 - 2 = 2$ $GB_v - GB_x = 0,5$	$GC_x = 18/7 = 2,5$ $GC_y = 35/7 = 5$ $GC_v = 5 - 2 = 3$ $GC_v - GC_x = 0,5$
Rekomendacje wielkości zmian, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić w wymiarach A, B, C, aby rozpocząć uruchomienie wdrożenia BC.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo wymaga poprawy o 1,5 w wymiarze (A), tj. gotowości technologii w przedsiębiorstwie.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo wymaga poprawy o 0,5 w wymiarze (B), tj. dojrzałości zarządzania danymi.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo wymaga poprawy o 0,5 w wymiarze (C), tj. gotowości danych.

Źródło: Opracowanie własne.

W następnym kroku stosowania modelu formalnego RM4DT, uzyskane dane posłużyły obliczeniu Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia BC.

6.1.1.5 Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia

Wartości parametrów wymiarów gotowości wykorzystano następnie do obliczenia poziomów Adekwatności planowanej skali wdrożenia BC do oczekiwanych rezultatów. Przeprowadzone obliczenia potwierdziły, że wdrożenie BC jest odpowiednio zaplanowane i racjonalne. Przebieg i wynik wykonanych obliczeń przedstawiono w Tabeli 6.5.

Tab. 6.5. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym

Model formalny RM4DT				
Tabela Adekwatności (A) planowanego wdrożenia BC				
Obliczenie zmian parametrów gotowości w wymiarach A, B, C oraz gotowości cyfrowej (PG)	$PA1 = 5 - 1 = 4$ $PA2 = 5 - 0 = 5$ $PA3 = 5 - 2 = 3$ $PA4 = 4 - 1 = 3$ $PA5 = 5 - 3 = 2$ $PA6 = 5 - 1 = 4$ $PA7 = 3 - 0 = 3$	$PB1 = 5 - 2 = 3$ $PB2 = 1 - 0 = 1$ $PB3 = 2 - 0 = 2$ $PB4 = 5 - 2 = 3$ $PB5 = 5 - 4 = 1$ $PB6 = 5 - 1 = 4$ $PB7 = 5 - 2 = 3$	$PC1 = 5 - 1 = 4$ $PC2 = 5 - 1 = 4$ $PC3 = 5 - 2 = 3$ $PC4 = 5 - 3 = 2$ $PC5 = 5 - 3 = 2$ $PC6 = 5 - 4 = 1$ $PC7 = 5 - 4 = 1$	$PG1 = 4 - 1 = 3$ $PG2 = 3 - 2 = 1$ $PG3 = 5 - 1 = 4$ $PG4 = 3 - 0 = 3$ $PG5 = 4 - 0 = 4$ $PG6 = 3 - 1 = 2$ $PG7 = 4 - 1 = 3$

Wartości zmian gotowości	$GAz = 24/7 = 3,43$	$GBz = 17/7 = 2,43$	$GCz = 17/7 = 2,43$	$Gz = 20/7 = 2,86$
Adekwatność wdrożenia (A)	$A = 1/3 \times (3,43 + 2,43 + 2,43) / Gz = 2,76 / 2,86 = 0,96$ A = 0,96 -> racjonalne, odpowiednie planowanie wdrożenia BC			

Źródło: Opracowanie własne

Następnie, wyliczone we wcześniejszych krokach wartości użyto do obliczenia Efektywności i Ryzyka powodzenia wdrożenia BC w przedsiębiorstwie usługowym przy użyciu wzorów, stanowiących elementy modelu formalnego RM4DT.

Efektywność (E) (równanie 9)

$$E = Gz / A \quad (9)$$

$$E = 2,86 / 0,96$$

$E = 2,98$ -> wdrożenie przeciętnie efektywne

Ryzyko (R) – zależne od Efektywności (E) (równanie 10)

$$RB = E < 4 \quad (10)$$

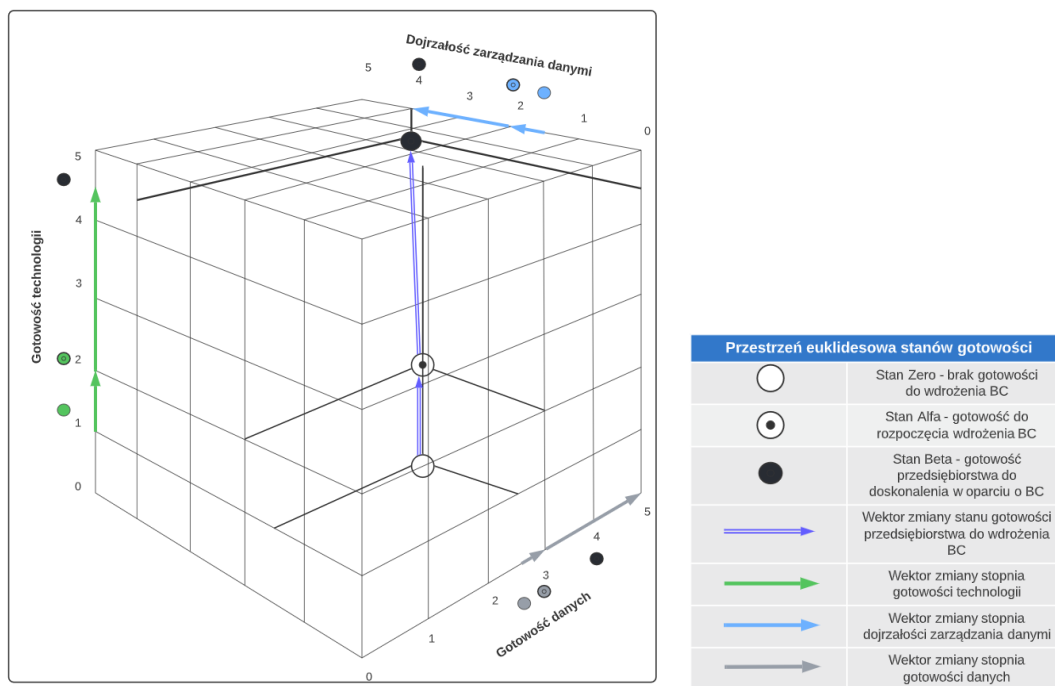
$$E = 2,98$$

$E = 2,98 = RB$ -> wdrożenie na akceptowalnym poziomie ryzyka

Wykonane obliczenia wykazały, że planowane wdrożenie BC znajduje się na przeciętnym poziomie efektywności oraz na akceptowalnym poziomie ryzyka.

6.1.1.6 Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego

Po wprowadzeniu wartości parametrów i wymiarów do modelu formalnego RM4DT, obliczono wartości stanów gotowości oraz wielkości zmian poziomów gotowości w poszczególnych wymiarach. Dane te wprowadzono do modelu graficznego RM4DT, uzyskując graficzny model gotowości przedsiębiorstwa usługowego do wdrożenia BC, co przedstawia Rysunek 6.2.



Rys. 6.2. Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego

Źródło: Opracowanie własne

Uwidoczniony na Rysunku 6.2 model graficzny RM4DT przedstawia dwa wektory zmian, rekomendowanych w przypadku badanego przedsiębiorstwa usługowego. Pierwszy wektor, poprowadzony ze stanu Zero (reprezentowanego przez pusty okrąg) do stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku), obrazuje kierunek i skalę zmian, jakie przedsiębiorstwo powinno podjąć przed przystąpieniem do uruchomienia wdrożenia BC. Natomiast drugi wektor, poprowadzony ze stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku) do stanu Beta (reprezentowanego przez całkowicie wypełniony okrąg) reprezentuje kierunek i skalę zmian, jakie badane przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić, aby osiągnąć stan oczekiwany wskutek wdrożenia BC. Z uwagi na niski zastany poziom gotowości przedsiębiorstwa oraz wysokie wartości stanu oczekiwanego, wytyczone zostały stosunkowo długie wektory zmian w porównaniu z innymi badanymi przedsiębiorstwami, co powoduje, że wyliczone wartości umiejscowiły planowane wdrożenie BC na granicy efektywności i racjonalności. W tym przypadku przedsiębiorstwo powinno rozważyć zmianę stanu oczekiwanego po wdrożeniu BC, co skutkowałoby skróceniem wektorów zmian przy jednoczesnym podniesieniu Efektywności oraz obniżeniu poziomu Ryzyka.

6.1.2. Zastosowanie modelu RM4DT - przykład przedsiębiorstwa handlowego

6.1.2.1 Charakterystyka obiektu badań

Do udziału w badaniu pozyskano przedsiębiorstwo handlowe z branży informatycznej – integratora systemów teleinformatycznych i niskoprądowych. Głównym obszarem działalności przedsiębiorstwa jest sprzedaż i instalacja systemów telekomunikacyjnych w zakładach przemysłowych oraz obiektach medycznych. Uczestniczące w badaniu przedsiębiorstwo zatrudnia 14 osób i osiąga obroty w przedziale od dwóch do dziesięciu milionów euro rocznie. Charakterystykę przedsiębiorstwa przedstawia Tabela 6.6.

Tab. 6.6. Charakterystyka przedsiębiorstwa handlowego uczestniczącego w badaniu

Charakterystyka przedsiębiorstwa	
Rodzaj działalności	handel
Branża	oprogramowanie / teletechnika
Wielkość zatrudnienia (liczba pracowników)	10-49
Przychody roczne netto	od 2 do 10 mln euro
Czy planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego	TAK

Źródło: opracowanie własne

6.1.2.2 Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przedsiębiorstwo planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego przede wszystkim w celu skrócenia czasu podejmowania decyzji inwestycyjnych, głównie w odniesieniu do rozwoju własnych nowych produktów i usług. Wśród szczegółowych celów przedsiębiorstwa znajdują się przyspieszenie świadczenia usług, wzrost sprzedaży systemów teleinformatycznych, optymalizacja procesów i procedur obsługiwanych manualnie przez pracowników. Przedsiębiorstwo dysponuje ponad dziesięcioletnią bazą danych finansowych wraz z opisaną czasochłonnością realizowanych projektów oraz algorytmami działań pracowników przy realizowanych projektach. Przedmiot planowanego wdrożenia wraz z listą celów przedstawia Tabela 6.7.

Tab. 6.7. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie handlowym

Przedmiot planowanego wdrożenia BC	
Główny cel	a) skrócenie czasu podejmowania decyzji finansowych/inwestycyjnych
Dodatkowe cele	b) przyspieszenie / podniesienie wydajności produkcji lub świadczenia usług, c) zwiększenie sprzedaży

Istniejące zbiory danych przydatne przy wdrożeniu	d) algorytmy działania zasobów ludzkich (własnych i obcych), e) czasochłonność wykonywania poszczególnych etapów procesów f) dane w zakresie analizy finansowej dot. rentowności realizowanych projektów wdrożeniowych
Miejsce przechowywania danych	na serwerach (głównie u dostawców narzędzi) różnych narzędzi: Jira, program FiK, CRM, Excel.
Czy przetwarzanie danych daje pozytywne efekty?	Tak
Działy zaangażowane we wdrożenie BC	handlowy, projektowy, zarząd, realizacyjny, finansowy

Źródło: opracowanie własne

6.1.2.3 Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przeprowadzona ocena stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC wykazała średnio wysoki poziom gotowości technologii, danych oraz dojrzałości zarządzania danymi (w okolicach poziomu 3). Dokładna ocena zastanego i docelowego stanów gotowości została przedstawiona w Tabeli 6.8.

Tab. 6.8. Ocena gotowości przedsiębiorstwa handlowego do wdrożenia BC

OCENA STANU GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BLIŹNIAKA CYFROWEGO						
Parametr	Opis parametru	Stan gotowości				
		0	1	2	3	4
Parametry wymiaru A	Gotowość technologii w przedsiębiorstwie					
PA1	Użyteczność i intuicyjność: działanie technologii jest zrozumiałe, użyteczne i intuicyjne dla wszystkich grup użytkowników; regularnie prowadzone są testy w tym zakresie w przedsiębiorstwie oraz wśród partnerów i klientów.				x	y
PA2	Wierność odzwierciedlenia: jak intensywne i regularne są prace przedsiębiorstwa nad podnoszeniem poziomu dokładności i trafności wirtualnego odzwierciedlenia rzeczywistych obiektów i/lub procesów przez technologie.			x		y
PA3	Zewnętrzne narzędzia i dane: jakim poziomem zdolności do korzystania z zewnętrznych narzędzi oraz zasobów cyfrowych (np. danych technicznych, czy finansowych) dysponuje przedsiębiorstwo dzięki technologiom.			x		y
PA4	Autoanaliza: zdolność technologii do rozpoznawania wzorców oraz wczesnego identyfikowania błędów,			x		y

	anomali, odchylen od domyślnych procedur oraz rekomendowania i automatycznego wdrażania usprawnień.						
PA5	Angażowanie partnerów/klientów: w jakim stopniu technologie przedsiębiorstwa są wykorzystywane przez partnerów biznesowych i/lub w jakim stopniu przedsiębiorstwo pozyskuje/korzysta z danych cyfrowych pochodzących od partnerów/klientów.				x	y	
PA6	Integralność: wszystkie komponenty technologii są sprawne, wykorzystywane i w pełni zintegrowane między sobą, jak i ze stale poszerzanym zakresem źródeł danych w przedsiębiorstwie i poza nim, pracują w oparciu o ujednolicone standardy.			x		y	
PA7	Adaptacyjność: technologie w przedsiębiorstwie rozwiązują nowe zadania zgodnie z przeznaczeniem i funkcjami technologii, również w przypadku konfrontacji z nowym problemem, wątkiem lub kontekstem.			x		y	
Parametry wymiaru B	Dojrzałość zarządzania danymi						
PB1	Pozyskiwanie i zarządzanie: zdolność pozyskiwania i/lub generowania niezawodnych, aktualnych i użytecznych danych cyfrowych.			x		y	
PB2	Analizowanie rynku i trendy: zdolność obserwowania trendów zmian potrzeb i oczekiwań kluczowych grup klientów przedsiębiorstwa oraz reagowania na te zmiany w oparciu o dane dotyczące konkurencji oraz opinii klientów i partnerów przedsiębiorstwa w odniesieniu do produktów/usług.			x		y	
PB3	Obsługa nowych zastosowań i skuteczność: zdolność i skuteczność działu IT przedsiębiorstwa w mobilizowaniu danych cyfrowych dla nowego specyficznego celu dowolnego zespołu, użytkownika lub potrzeby biznesowej, np. w celu opracowania nowej wersji produktu, weryfikacji opłacalności usługi, modyfikacji stanowiska pracy, itd.			x		y	
PB4	Podejmowanie decyzji i wiarygodność: zdolność szybkiego i elastycznego opisywania, segregowania i redukowania danych oraz do podejmowania decyzji w oparciu o wiarygodne dane.			x		y	
PB5	Zabezpieczanie i etyka: zdolność zabezpieczania i etycznego wykorzystywania danych cyfrowych, w tym danych o klientach i ich preferencjach w celu zwiększania wartości dodanej produktów/usług.			x		y	
PB6	Rozwój innowacji i eksperymenty: zdolność przedsiębiorstwa do rozwoju innowacji poprzez prowadzenie eksperymentów przy użyciu narzędzi i danych cyfrowych.			x		y	
PB7	Włączenie cyfrowe i kultura organizacji: na ile zrozumiała i powszechna wśród pracowników i partnerów		x			y	

	przedsiębiorstwa jest wiedza o danych cyfrowych, sposobie ich wykorzystywania oraz wpływie na rozwój przedsiębiorstwa i pracowników.						
Parametry wymiaru C	Dane cyfrowe						
PC1	Kompletność i spójność: w jakim stopniu opisy danych są spójnie oraz zawierają wszystkie przydatne w planowanym wdrożeniu tagi i atrybuty.			x		y	
PC2	Interoperacyjność: w jakim stopniu formaty i semantyka danych są interoperacyjne z popularnymi w przedsiębiorstwie i/lub wśród partnerów/klientów systemami i standardami.			x		y	
PC3	Gęstość / intensywność: w jakim stopniu ilość danych, generowanych na jednostkę czasu, przestrzeni, mocy zaspokaja potrzeby planowanego wdrożenia i/lub wykracza ponad ilości powszechne w podobnych zastosowaniach.		x			y	
PC4	Dostępność / wykrywalność: w jakim stopniu dane są dostępne, a opisy bądź atrybuty danych umożliwiają ich zwinne wyszukiwanie.			x		y	
PC5	Aktualność / częstotliwość: w jakim stopniu działania przedsiębiorstwa zapewniają dostęp do danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego.			x		y	
PC6	Wiarygodność danych: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia, że wszystkie dane są opisane w sposób wiarygodny i poprawny.			x		y	
PC7	Prywatność: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia neutralność danych pod względem zabezpieczenia prywatności i ochrony danych osobowych, np. poprzez anonimizację, bądź pseudonimizację.			x		y	

Źródło: opracowanie własne

Wskazane w drodze oceny gotowości przedsiębiorstwa parametry pozwoliły skwantyfikować stany gotowości zastany i docelowy, a także wskazać rekomendowane zmiany, jakich przedsiębiorstwo powinno dokonać w każdym z trzech wymiarów, aby osiągnąć stan gotowości do uruchomienia BC.

6.1.2.4 Wytyczenie wektora zmian

W wyniku przeprowadzonej oceny stanów gotowości uzyskano liczbowe wartości parametrów wymiarów gotowości, jak również wartości różnic pomiędzy stanami docelowymi a zastanymi. Następnie, wyliczone wartości posłużyły obliczeniu wektora zmian, wymaganych przed uruchomieniem wdrożenia BC. W przypadku badanego przedsiębiorstwa handlowego,

wymagane zmiany w każdym z wymiarów wyniosły zero punktów. Oznacza to brak konieczności przeprowadzenia zmian, tj. aktywności przygotowujących badane przedsiębiorstwo handlowe do uruchomienia wdrożenia BC. Wynika to z niewielkiej różnicy pomiędzy oczekiwanym a zastanym stanami gotowości oraz wyższego, niż w przypadku przedsiębiorstwa usługowego, zastanego poziomu gotowości do wdrożenia BC. W tym przypadku nie wytyczono wektora rekomendowanych zmian przygotowawczych. Przeprowadzone w tym zakresie obliczenia wraz z rekomendacjami przedstawiono w Tabeli 6.9.

Tab. 6.9. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym

Model formalny RM4DT			
Tabela zmiany stanów gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC			
Zmiany stanów gotowości w wymiarach A, B, C	Wartości planowanych zmian w wymiarze gotowości technologii (A)	Wartości planowanych zmian w wymiarze dojrzałości zarządzania danymi (B)	Wartości planowanych zmian w wymiarze gotowości danych (C)
Obliczenie wielkości rekomendowanych zmian w wymiarach A, B, C	$GA_x = 16/7 = 2,5$ $GA_y = 28/7 = 4,0$ $GA_v = 4,0 - 2 = 2,0$ $GA_v - GA_x = -0,5$	$GB_x = 13/7 = 2,0$ $GB_y = 28/7 = 4,0$ $GB_v = 4,0 - 2 = 2,0$ $GB_v - GB_x = 0,0$	$GC_x = 13/7 = 2,0$ $GC_y = 28/7 = 4,0$ $GC_v = 4,0 - 2 = 2,0$ $GC_v - GC_x = 0,0$
Rekomendacje wielkości zmian, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić w wymiarach A, B, C, aby rozpocząć uruchomienie wdrożenia BC.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (A), tj. gotowości technologii.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (B), tj. dojrzałości zarządzania danymi.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (C), tj. gotowości danych.

Źródło: opracowanie własne

W następnym kroku - stosowania modelu formalnego RM4DT - uzyskane dane posłużyły obliczeniu Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia BC.

6.1.2.5 Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia

Wartości parametrów wymiarów gotowości wykorzystano następnie do obliczenia poziomów Adekwatności planowanej skali wdrożenia BC do oczekiwanych rezultatów.

Przeprowadzone obliczenia potwierdziły, że wdrożenie BC jest odpowiednio zaplanowane i racjonalne. Przebieg i wynik wykonanych obliczeń przedstawiono w Tabeli 6.10.

Tab. 6.10. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie handlowym

Model formalny RM4DT				
Tabela Adekwatności (A) planowanego wdrożenia BC				
Obliczenie zmian parametrów gotowości w wymiarach A, B, C oraz gotowości cyfrowej (PG)	PA1 = 4-3 = 1	PB1 = 4-2 = 2	PC1 = 4-2 = 2	PG1 = 4-1 = 3
	PA2 = 4-2 = 2	PB2 = 4-2 = 2	PC2 = 4-2 = 2	PG2 = 5-2 = 3
	PA3 = 4-2 = 2	PB3 = 4-2 = 2	PC3 = 4-1 = 3	PG3 = 4-1 = 3
	PA4 = 4-2 = 2	PB4 = 4-2 = 2	PC4 = 4-2 = 2	PG4 = 4-3 = 1
	PA5 = 4-3 = 1	PB5 = 4-2 = 2	PC5 = 4-2 = 2	PG5 = 3-0 = 3
	PA6 = 4-2 = 2	PB6 = 4-2 = 2	PC6 = 4-2 = 2	PG6 = 3-2 = 1
	PA7 = 4-2 = 2	PB7 = 4-1 = 3	PC7 = 4-2 = 2	PG7 = 3-0 = 3
Wartości zmian gotowości	GAz = 12/7 = 1,71	GBz = 15/7 = 2,14	GCz = 15/7 = 2,14	Gz = 17/7 = 2,43
Adekwatność wdrożenia (A)	A = 1/3 x (1,71 + 2,14 + 2,14) / Gz = 2,00 / 2,43 = 0,82 A = 0,82 -> racjonalne, odpowiednie planowanie wdrożenia BC			

Źródło: opracowanie własne

Następnie, wyliczone we wcześniejszych krokach wartości użyto do obliczenia Efektywności i Ryzyka powodzenia wdrożenia BC w przedsiębiorstwie handlowym przy użyciu wzorów, stanowiących elementy modelu formalnego RM4DT.

Efektywność (E) (równanie 11)

$$E = G_z / A \quad (11)$$

$$E = 2,43 / 0,82$$

E = 2,96 -> wdrożenie przeciętnie efektywne

Ryzyko (R) – zależne od Efektywności (E) (równanie 12)

$$RB = E < 4 \quad (12)$$

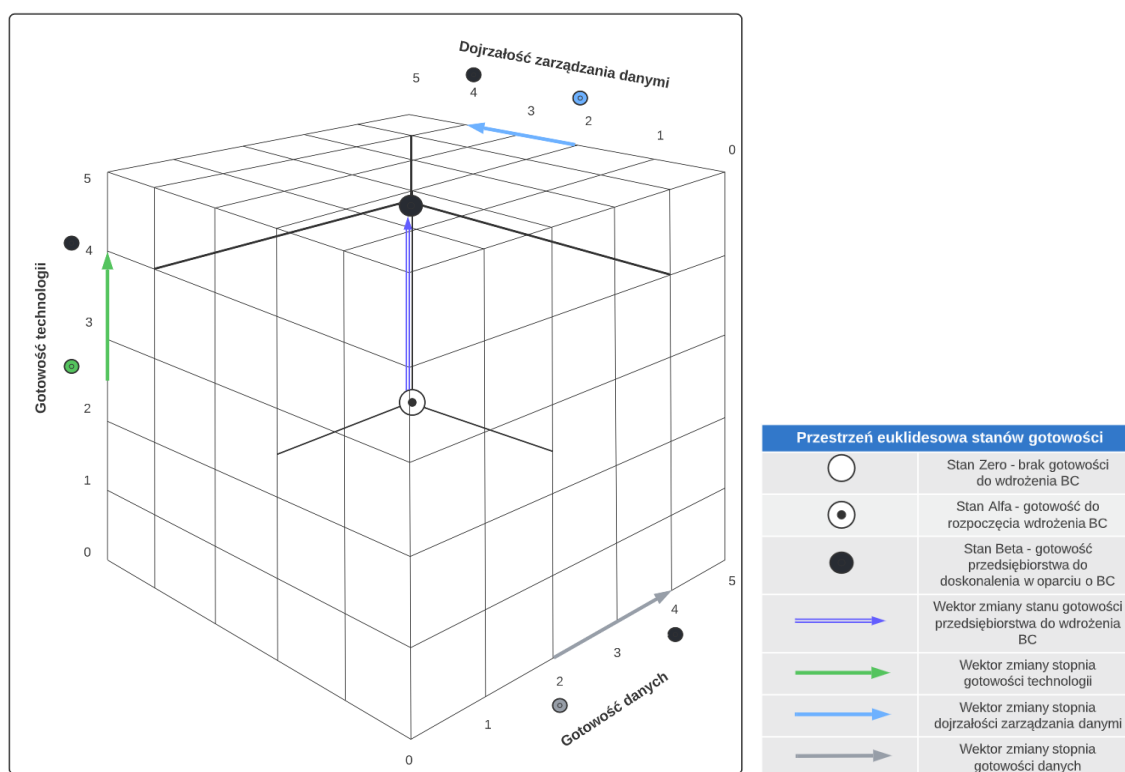
$$E = 2,96$$

E = 2,96 = RB -> wdrożenie na akceptowalnym poziomie ryzyka

Wykonane obliczenia wykazały, że planowane wdrożenie BC znajduje się na przeciętnym poziomie efektywności oraz na akceptowalnym poziomie ryzyka.

6.1.2.6 Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego

Po wprowadzeniu wartości parametrów i wymiarów do modelu formalnego RM4DT, uzyskano wartości stanów gotowości oraz wielkości zmian poziomów gotowości w poszczególnych wymiarach. Dane te wprowadzono do modelu graficznego RM4DT, uzyskując graficzny model gotowości przedsiębiorstwa handlowego do wdrożenia BC, co przedstawia Rysunek 6.3.



Rys. 6.3. Przykład modelu graficznego RM4DT dla przedsiębiorstwa handlowego

Źródło: opracowanie własne

Uwidoczniony na Rysunku 6.3 model graficzny RM4DT przedstawia wektory zmian, przewidywanych w przypadku badanego przedsiębiorstwa handlowego. W odróżnieniu od przedsiębiorstwa usługowego, w przypadku przedsiębiorstwa handlowego nie wytyczono wektora ze stanu Zero do stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku), ponieważ stany te są tożsame. Oznacza to zastaną gotowość przedsiębiorstwa handlowego do

uruchomienia wdrożenia BC. Natomiast wektor, poprowadzony ze stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku) do stanu Beta (reprezentowanego przez całkowicie wypełniony okrąg) reprezentuje kierunek i skalę zmian, jakie badane przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić, aby osiągnąć stan oczekiwany wskutek wdrożenia BC. Z uwagi na średni zastany poziom gotowości przedsiębiorstwa oraz niewysokie wartości stanu oczekiwanego, wytyczony został średniej długości wektor zmian. W tym przypadku przedsiębiorstwo może przystąpić do uruchomienia wdrożenia BC bez inwestycji w prace przygotowawcze.

6.1.3 Zastosowanie modelu RM4DT-przykład przedsiębiorstwa produkcyjnego

6.1.3.1 Charakterystyka obiektu badań

Do udziału w badaniu pozyskano przedsiębiorstwo produkcyjne z branży motoryzacyjnej – producenta samochodów dostawczych. Głównym obszarem działalności przedsiębiorstwa produkcja samochodów dostawczych średniej wielkości, do 3,5 tony. Uczestniczące w badaniu przedsiębiorstwo zatrudnia powyżej 250 osób i osiąga obroty powyżej 43 milionów euro rocznie. Charakterystykę przedsiębiorstwa przedstawia Tabela 6.11.

Tab. 6.11. Charakterystyka przedsiębiorstwa produkcyjnego uczestniczącego w badaniu

Charakterystyka przedsiębiorstwa	
Rodzaj działalności	produkcja
Branża	motoryzacyjna
Wielkość zatrudnienia (liczba pracowników)	250 lub więcej
Przychody roczne netto	powyżej 43 mln euro
Czy planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego	TAK

Źródło: opracowanie własne

6.1.3.2 Planowany zakres wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przedsiębiorstwo planuje wdrożenie bliźniaka cyfrowego przede wszystkim w celu zmniejszenia zużycia energii, ze szczególnym uwzględnieniem procesów intralogistycznych oraz wybranych stanowisk roboczych. Wśród szczegółowych celów przedsiębiorstwa znajdują się podniesienie wydajności produkcji, możliwość kustomizacji wybranych produktów, wprowadzenie autonomicznych robotów współpracujących, podniesienie trafności i skrócenie

czasu podejmowania decyzji oraz zmniejszenie bezczynności wybranych stanowisk roboczych. Przedsiębiorstwo dysponuje dużą bazą historycznych danych oraz licznymi narzędziami gromadzenia i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. Dane są umiarkowanie scentralizowane, lecz niespójne. Przedmiot planowanego wdrożenia BC wraz z listą celów przedstawia Tabela 6.12.

Tab. 6.12. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie produkcyjnym

Przedmiot planowanego wdrożenia BC	
Główny cel	a) zmniejszenie zużycia energii
Dodatkowe cele	b) przyspieszenie / podniesienie wydajności produkcji lub świadczenia usług c) masowa kastomizacja – różnicowanie masowego produktu na życzenie klienta d) kobotyzacja – wprowadzenie robotów współpracujących z operatorami ludzkimi e) podniesienie trafności decyzji finansowych w oparciu o bieżące monitorowanie i zarządzanie danymi f) skrócenie czasu podejmowania decyzji finansowych/inwestycyjnych g) minimalizacja liczby i czasu nieplanowanych przestojów na wybranych stanowiskach roboczych
Istniejące zbiory danych przydatne przy wdrożeniu	a) system sterowania produkcją – FIS; b) system budowy zleceń na produkcję: numery części, specyfikacja, parametry, ilości, zużycie, logistyka; c) dane z sensorów zużycia energii zgodne z ISO 50001 d) MES – w tym dane systemu predykcji w oparciu o czasy odpowiedzi z układu – przepływy z czujnika A do B
Miejsce przechowywania danych	a) serwery własne b) brak narzędzi chmurowych za wyjątkiem elementów SAP c) data lake logistyczny
Czy przetwarzanie danych daje pozytywne efekty?	Tak, np. predykcja pozwala ocenić stan zużycia i generuje oszczędności na przestojach.
Działy zaangażowane we wdrożenie BC	IT, produkcja, planowanie, ew. logistyka, finanse

Źródło: opracowanie własne

6.1.3.3 Wyniki oceny gotowości do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Przeprowadzona ocena stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC wykazała wysoki poziom gotowości danych (poziom 4 lub wyższy) oraz średnio wysokie poziomy

gotowości technologii oraz dojrzałości zarządzania danymi (w okolicach poziomu 3). Dokładna ocena zastanego i docelowego stanów gotowości została przedstawiona w Tabeli 6.13.

Tab. 6.13. Ocena gotowości przedsiębiorstwa produkcyjnego do wdrożenia BC

OCENA STANU GOTOWOŚCI PRZEDSIĘBIORSTWA DO WDROŻENIA BLIŻNIAKA CYFROWEGO						
Parametr	Opis parametru	Stan gotowości				
		0	1	2	3	4
Parametry wymiaru A	Gotowość technologii w przedsiębiorstwie					
PA1	Użyteczność i intuicyjność: działanie technologii jest zrozumiałe, użyteczne i intuicyjne dla wszystkich grup użytkowników; regularnie prowadzone są testy w tym zakresie w przedsiębiorstwie oraz wśród partnerów i klientów.			x	y	
PA2	Wierność odzwierciedlenia: jak intensywne i regularne są prace przedsiębiorstwa nad podnoszeniem poziomu dokładności i trafności wirtualnego odzwierciedlenia rzeczywistych obiektów i/lub procesów przez technologie.		x			y
PA3	Zewnętrzne narzędzia i dane: jakim poziomem zdolności do korzystania z zewnętrznych narzędzi oraz zasobów cyfrowych (np. danych technicznych, czy finansowych) dysponuje przedsiębiorstwo dzięki technologiom.			x		y
PA4	Autoanaliza: zdolność technologii do rozpoznawania wzorców oraz wczesnego identyfikowania błędów, anomalii, odchyłeń od domyślnych procedur oraz rekomendowania i automatycznego wdrażania usprawnień.			x		y
PA5	Angażowanie partnerów/klientów: w jakim stopniu technologie przedsiębiorstwa są wykorzystywane przez partnerów biznesowych i/lub w jakim stopniu przedsiębiorstwo pozyskuje/korzysta z danych cyfrowych pochodzących od partnerów/klientów.			x	y	
PA6	Integralność: wszystkie komponenty technologii są sprawne, wykorzystywane i w pełni zintegrowane między sobą, jak i ze stale poszerzanym zakresem źródeł danych w przedsiębiorstwie i poza nim, pracują w oparciu o ujednolicone standardy.				x	y
PA7	Adaptacyjność: technologie w przedsiębiorstwie rozwiązują nowe zadania zgodnie z przeznaczeniem i funkcjami technologii, również w przypadku konfrontacji z nowym problemem, wątkiem lub kontekstem.				x	y
Parametry wymiaru B	Dojrzałość zarządzania danymi					

PB1	Pozyskiwanie i zarządzanie: zdolność pozyskiwania i/lub generowania niezawodnych, aktualnych i użytecznych danych cyfrowych.				x	y	
PB2	Analizowanie rynku i trendy: zdolność obserwowania trendów zmian potrzeb i oczekiwań kluczowych grup klientów przedsiębiorstwa oraz reagowania na te zmiany w oparciu o dane dotyczące konkurencji oraz opinii klientów i partnerów przedsiębiorstwa w odniesieniu do produktów/usług.				x	y	
PB3	Obsługa nowych zastosowań i skuteczność: zdolność i skuteczność działu IT przedsiębiorstwa w mobilizowaniu danych cyfrowych dla nowego specyficznego celu dowolnego zespołu, użytkownika lub potrzeby biznesowej, np. w celu opracowania nowej wersji produktu, weryfikacji opłacalności usługi, modyfikacji stanowiska pracy, itd.			x		y	
PB4	Podejmowanie decyzji i wiarygodność: zdolność szybkiego i elastycznego opisywania, segregowania i redukowania danych oraz do podejmowania decyzji w oparciu o wiarygodne dane.				x	y	
PB5	Zabezpieczanie i etyka: zdolność zabezpieczania i etycznego wykorzystywania danych cyfrowych, w tym danych o klientach i ich preferencjach w celu zwiększania wartości dodanej produktów/usług.					x	y
PB6	Rozwój innowacji i eksperymenty: zdolność przedsiębiorstwa do rozwoju innowacji poprzez prowadzenie eksperymentów przy użyciu narzędzi i danych cyfrowych.			x		y	
PB7	Włączenie cyfrowe i kultura organizacji: na ile zrozumiała i powszechna wśród pracowników i partnerów przedsiębiorstwa jest wiedza o danych cyfrowych, sposobie ich wykorzystywania oraz wpływie na rozwój przedsiębiorstwa i pracowników.				x	y	
Parametry wymiaru C	Dane cyfrowe						
PC1	Kompletność i spójność: w jakim stopniu opisy danych są spójnie oraz zawierają wszystkie przydatne w planowanym wdrożeniu tagi i atrybuty.					x	y
PC2	Interoperacyjność: w jakim stopniu formaty i semantyka danych są interoperacyjne z popularnymi w przedsiębiorstwie i/lub wśród partnerów/klientów systemami i standardami.				x	y	
PC3	Gęstość / intensywność: w jakim stopniu ilość danych, generowanych na jednostkę czasu, przestrzeni, mocy zaspokaja potrzeby planowanego wdrożenia i/lub wykracza ponad ilości powszechne w podobnych zastosowaniach.					x	y

PC4	Dostępność / wykrywalność: w jakim stopniu dane są dostępne, a opisy bądź atrybuty danych umożliwiają ich zwinne wyszukiwanie.				x	y	
PC5	Aktualność / częstotliwość: w jakim stopniu działania przedsiębiorstwa zapewniają dostęp do danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego.					x	y
PC6	Wiarygodność danych: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia, że wszystkie dane są opisane w sposób wiarygodny i poprawny.					x	y
PC7	Prywatność: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia neutralność danych pod względem zabezpieczenia prywatności i ochrony danych osobowych, np. poprzez anonimizację, bądź pseudonimizację.					x	y

Źródło: opracowanie własne

Wskazane w drodze oceny gotowości przedsiębiorstwa parametry pozwoliły skwantyfikować stany gotowości zastany i docelowy, a także wskazać rekomendowane zmiany, jakich przedsiębiorstwo powinno dokonać w każdym z trzech wymiarów, aby osiągnąć stan gotowości do uruchomienia BC.

6.1.3.4 Wytyczenie wektora zmian

W wyniku przeprowadzonej oceny stanów gotowości uzyskano liczbowe wartości parametrów wymiarów gotowości, jak również wartości różnic pomiędzy stanami docelowymi a zastanymi. Następnie, wyliczone wartości posłużyły obliczeniu wektora zmian, wymaganych przed uruchomieniem wdrożenia BC. W przypadku badanego przedsiębiorstwa produkcyjnego nie wykazano konieczności przeprowadzenia aktywności przygotowujących do uruchomienia wdrożenia BC. Kluczowy wpływ na tę sytuację miał wysoki zastany poziom gotowości badanego przedsiębiorstwa produkcyjnego do wdrożenia BC. Przeprowadzone w tym zakresie obliczenia wraz z rekomendacjami przedstawiono w Tabeli 6.14.

Tab. 6.14. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie produkcyjnym

Model formalny RM4DT			
Tabela zmiany stanów gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC			
Zmiany stanów gotowości w wymiarach A, B, C	Wartości planowanych zmian w wymiarze gotowości technologii (A)	Wartości planowanych zmian w wymiarze dojrzałości zarządzania danymi (B)	Wartości planowanych zmian w wymiarze gotowości danych (C)

Obliczenie wielkości rekomendowanych zmian w wymiarach A, B, C	$G_{Ax} = 15/7 = 2,0$ $G_{Ay} = 26/7 = 3,5$ $G_{Av} = 3,5 - 2 = 1,5$ $G_{Av} - G_{Ax} = -0,5$	$G_{Bx} = 20/7 = 3,0$ $G_{By} = 28/7 = 4,0$ $G_{Bv} = 4,0 - 2 = 2,0$ $G_{Bv} - G_{Bx} = -1,0$	$G_{Cx} = 26/7 = 3,5$ $G_{Cy} = 32/7 = 4,5$ $G_{Cv} = 4,5 - 2 = 2,5$ $G_{Cv} - G_{Cx} = -1,0$
Rekomendacje wielkości zmian, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić w wymiarach A, B, C, aby rozpocząć uruchomienie wdrożenia BC.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (A), tj. gotowości technologii.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (B), tj. dojrzałości zarządzania danymi.	Aby osiągnąć gotowość do uruchomienia wdrożenia BC, przedsiębiorstwo nie wymaga poprawy w wymiarze (C), tj. gotowości danych.

Źródło: opracowanie własne

W następnym kroku stosowania modelu formalnego RM4DT, uzyskane dane posłużyły obliczeniu Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia BC.

6.1.3.5 Wyznaczenie Adekwatności, Efektywności i Ryzyka wdrożenia

Wartości parametrów wymiarów gotowości wykorzystano następnie do obliczenia poziomów Adekwatności planowanej skali wdrożenia BC do oczekiwanych rezultatów. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że mimo wysokiego zastanego poziomu gotowości do wdrożenia BC, planowane wdrożenie BC jest nieracjonalne, z powodu nadmiernego zakresu planowanych zmian względem oczekiwanych efektów. Przebieg i wynik wykonanych obliczeń przedstawiono w Tabeli 6.15.

Tab. 6.15. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie produkcyjnym

Model formalny RM4DT				
Tabela Adekwatności (A) planowanego wdrożenia BC				
Obliczenie zmian parametrów gotowości w wymiarach A, B, C oraz gotowości cyfrowej (PG)	$PA1 = 3 - 2 = 1$ $PA2 = 4 - 1 = 3$ $PA3 = 4 - 2 = 2$ $PA4 = 4 - 2 = 2$ $PA5 = 3 - 2 = 1$ $PA6 = 4 - 3 = 1$ $PA7 = 4 - 3 = 1$	$PB1 = 4 - 3 = 1$ $PB2 = 4 - 3 = 1$ $PB3 = 4 - 2 = 2$ $PB4 = 4 - 3 = 1$ $PB5 = 4 - 4 = 0$ $PB6 = 4 - 2 = 2$ $PB7 = 4 - 3 = 1$	$PC1 = 5 - 4 = 1$ $PC2 = 4 - 3 = 1$ $PC3 = 4 - 4 = 0$ $PC4 = 4 - 3 = 1$ $PC5 = 5 - 4 = 1$ $PC6 = 5 - 4 = 1$ $PC7 = 5 - 4 = 1$	$PG1 = 5 - 3 = 2$ $PG2 = 4 - 4 = 0$ $PG3 = 4 - 3 = 1$ $PG4 = 4 - 3 = 1$ $PG5 = 4 - 4 = 0$ $PG6 = 5 - 3 = 2$ $PG7 = 4 - 3 = 1$
Wartości zmian gotowości	$G_{Az} = 11/7 = 1,57$	$G_{Bz} = 8/7 = 1,14$	$G_{Cz} = 6/7 = 0,86$	$G_z = 7/7 = 1,00$
Adekwatność wdrożenia (A)	$A = 1/3 \times (1,71 + 2,14 + 2,14) / G_z = 1,19 / 1 = 1,19$			

	A = 1,19 -> nieracjonalne, nadmierna planowana zmiana w wymiarze gotowości technologii (GAz) i/lub zarządzania danymi (GBz) i/lub gotowości technologii (GCz) względem oczekiwanej zmiany stanu gotowości cyfrowej (Gz)
--	--

Źródło: opracowanie własne

Następnie, wyliczone we wcześniejszych krokach wartości użyto do obliczenia Efektywności i Ryzyka powodzenia wdrożenia BC w przedsiębiorstwie usługowym przy użyciu wzorów, stanowiących elementy modelu formalnego RM4DT.

Efektywność (E) (równanie 13)

$$E = Gz / A \quad (13)$$

$$E = 1 / 1,19$$

E = 0,84 -> wdrożenie nieefektywne

Ryzyko (R) – zależne od Efektywności (E) (równanie 14)

$$RB = E < 4 \quad (14)$$

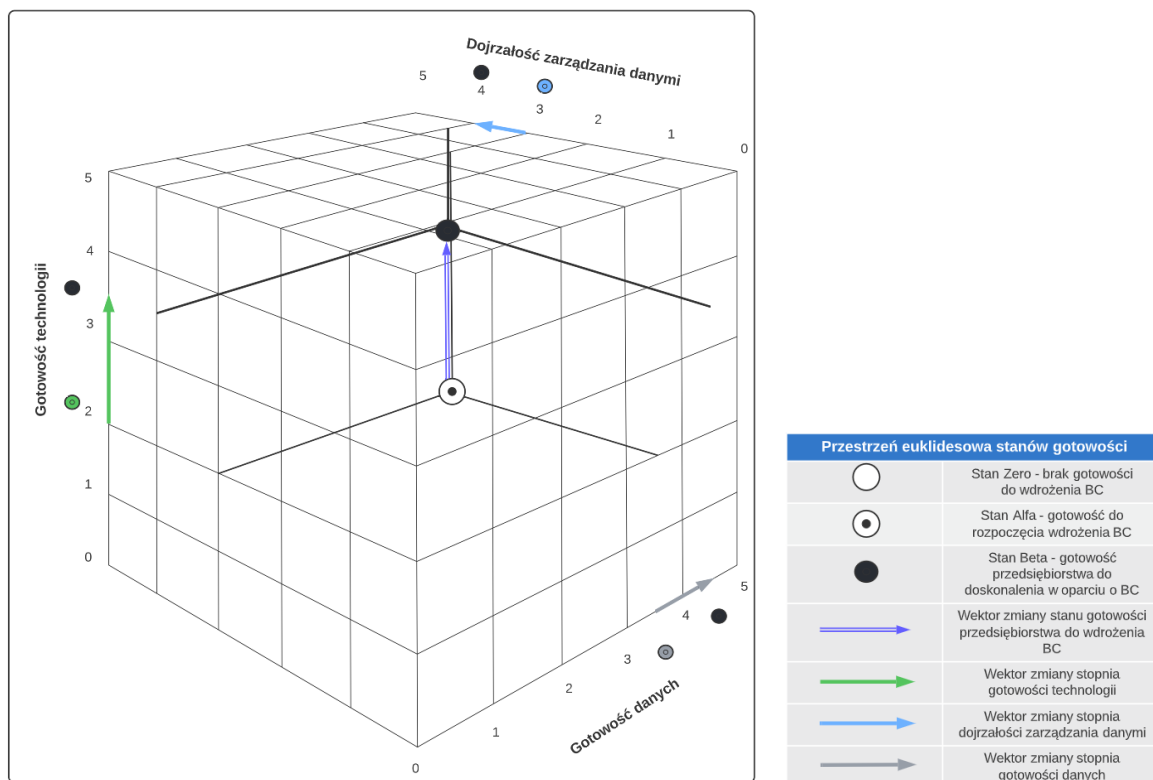
$$E = 0,84$$

E = 0,84 = RB -> wdrożenie na akceptowalnym poziomie ryzyka

Wykonane obliczenia wykazały, że planowane wdrożenie BC będzie nieefektywne, choć znajduje się na akceptowalnym poziomie ryzyka.

6.1.3.6 Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego

Po wprowadzeniu wartości parametrów i wymiarów do modelu formalnego RM4DT, obliczono wartości stanów gotowości oraz wielkości zmian poziomów gotowości w poszczególnych wymiarach. Dane te wprowadzono do modelu graficznego RM4DT, uzyskując graficzny model gotowości przedsiębiorstwa produkcyjnego do wdrożenia BC, co przedstawia Rysunek 6.4.



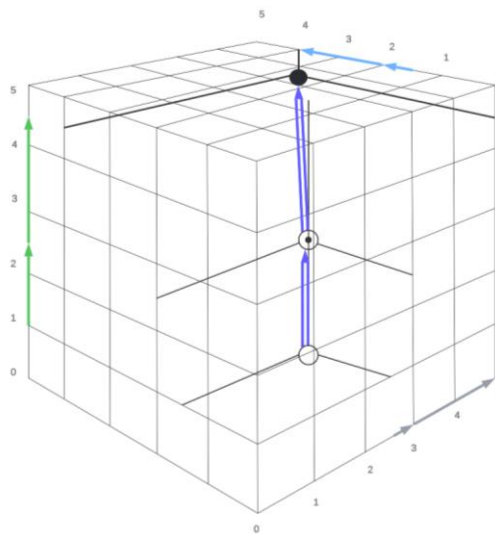
Rys. 6.4. Przykład modelu graficznego RM4DT dla przedsiębiorstwa produkcyjnego

Źródło: Opracowanie własne

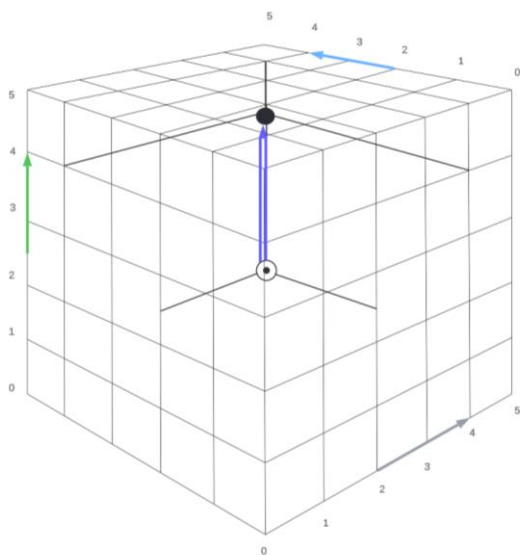
Uwidoczniony na Rysunku 6.4 model graficzny RM4DT przedstawia wektor zmian, przewidywanych w przypadku badanego przedsiębiorstwa produkcyjnego. W odróżnieniu od przedsiębiorstwa usługowego, w przypadku przedsiębiorstwa produkcyjnego nie wytyczono wektora ze stanu Zero do stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku), ponieważ stany te są tożsame. Oznacza to zastaną gotowość przedsiębiorstwa handlowego do uruchomienia wdrożenia BC. Natomiast wektor, poprowadzony ze stanu Alfa (reprezentowanego przez okrąg z punktem pośrodku) do stanu Beta (reprezentowanego przez całkowicie wypełniony okrąg) reprezentuje kierunek i skalę zmian, jakie badane przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić, aby osiągnąć stan oczekiwany wskutek wdrożenia BC. Z uwagi na wysoki zastany poziom gotowości przedsiębiorstwa oraz wysokie wartości stanu oczekiwanego, wytyczony został krótki wektor zmian. W tym przypadku przedsiębiorstwo może przystąpić do uruchomienia wdrożenia BC bez inwestycji w prace przygotowawcze, jednak powinno rozważyć zmniejszenie skali zmian związanych z wdrożeniem BC, aby planowane zmiany były adekwatne do oczekiwanych korzyści i uwzględniały aktualny wysoki poziom gotowości.

6.2 Praktyczne zastosowanie modelu RM4DT – konkluzje z badań

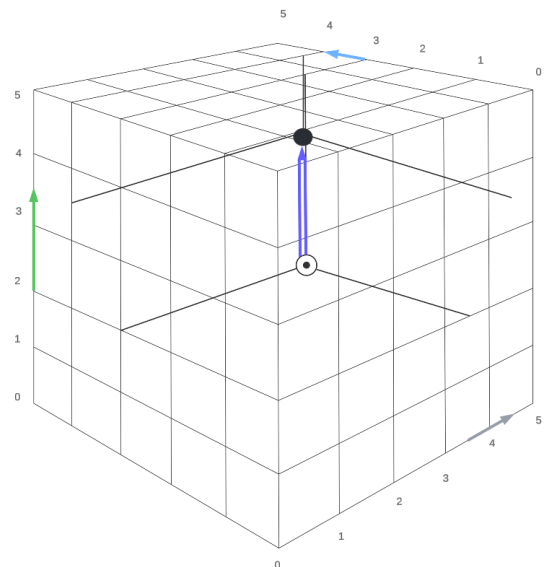
Badania przeprowadzone z udziałem przedsiębiorstw, planujących wdrożenie BC, wykazały praktyczną przydatność modelu RM4DT w podejmowaniu decyzji. W każdym z analizowanych przypadków model RM4DT stanowi syntezę pozornie odległych, lecz istotnych z perspektywy wdrożenia parametrów. Ponadto, wprowadzone do modelu parametry, dostarczają rekomendacji w postaci liczbowej i wizualnej w zakresie aktywności, jakie każde z przedsiębiorstw powinno podjąć, aby wdrożyć BC.



Wektory zmian - przedsiębiorstwo usługowe (A)



Wektor zmian - przedsiębiorstwo handlowe (B)



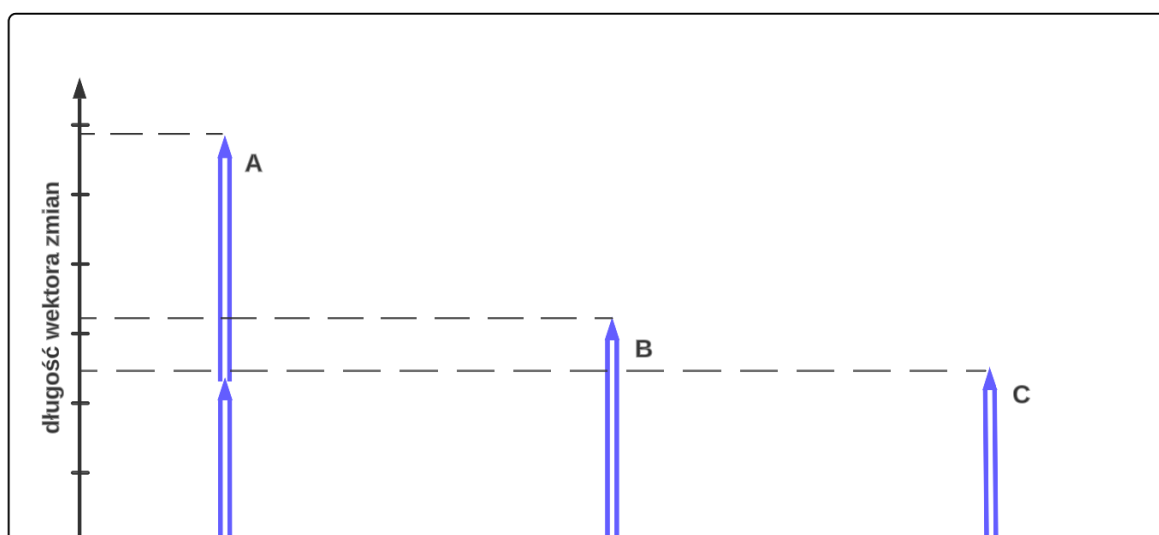
Wektor zmian - przedsiębiorstwo produkcyjne (C)

Rys. 6.5 Porównanie modeli graficznych RM4DT przykładowych przedsiębiorstw A, B, C

Źródło: Opracowanie własne

Jak przedstawiono na Rys. 6.5, w pierwszym przypadku (A) model wykazał brak gotowości przedsiębiorstwa usługowego do uruchomienia wdrożenia, co wizualizuje pusty okrąg oraz skierowany do sąsiedniego okręgu wektor zmian, niezbędnych do osiągnięcia gotowości do uruchomienia wdrożenia. W dwu kolejnych porównywanych przypadkach (B; C), model formalny RM4DT wykazał gotowość przedsiębiorstw handlowego i produkcyjnego do uruchomienia wdrożenia. Stąd, model graficzny RM4DT w tych dwu przypadkach nie uwidacznia braku gotowości Zero. Oznacza to, że przedsiębiorstwa B i C są gotowe do uruchomienia wdrożenia BC i nie muszą podejmować aktywności, przygotowujących.

Dodatkowym aspektem analizy prezentowanego zestawienia jest porównanie długości wektorów rekomendowanych zmian, które przedstawiono na Rysunku 6.6.



Rys. 6.6. Porównanie wektorów zmian stanów gotowości przykładowych przedsiębiorstw usługowego A, handlowego B i produkcyjnego C

Źródło: Opracowanie własne

Zestawienie długości wektorów uwidacznia różnice skali zmian, rekomendowanych do przeprowadzenia w poszczególnych przedsiębiorstwach. Szczególnie wyraźnie widoczna jest różnica między łączną długością wektorów zmian w przedsiębiorstwie usługowym (A) a długością wektora zmian w przedsiębiorstwie produkcyjnym (C).

Niewielka skala rekomendowanych przez model zmian w przypadku przedsiębiorstwa produkcyjnego (C) wynika z wysokiego zastanego poziomu gotowości i niewygórowanych oczekiwań w odniesieniu do stanu docelowego. Przedstawione wizualnie modele RM4DT stanowią odzwierciedlenie liczbowej kwantyfikacji wywiadów przeprowadzonych w

analizowanych przedsiębiorstwach. Zestawienie modelu graficznego planowanych zmian z modelami graficznymi innych przedsiębiorstw, w których procesy wdrażania BC już ukończono, może stanowić dodatkowe wsparcie decyzji o uruchomieniu lub rezygnacji z wdrożenia, bądź o zmianie parametrów stanu oczekiwanego po wdrożeniu.

W podsumowaniu praktycznego zastosowania modelu RM4DT można podkreślić, że dzięki liczbowej reprezentacji trudno uchwytnych parametrów oraz ich graficznej wizualizacji, model dostarcza nowej wiedzy, przydatnej w podejmowaniu decyzji o wdrożeniu BC. Ponadto, przeprowadzona pomyślnie w przedsiębiorstwach z trzech różnych sektorów walidacja modelu RM4DT, potwierdziła uniwersalny charakter samego modelu, jak i jego poszczególnych części składowych, w szczególności zastosowanych wymiarów, parametrów i zaproponowanego procesu stosowania.

7. WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Model RM4DT porządkuje i uzupełnia zarówno opisywane w literaturze, jak i stosowane w praktyce biznesowej wzorce i standardy zarządzania wdrożeniem bliźniaka cyfrowego w przedsiębiorstwach. RM4DT jest propozycją praktycznego narzędzia do wykorzystania przez przedsiębiorstwo z dowolnego sektora, skoncentrowaną na istotnych z perspektywy wdrożenia BC czynnikach efektywności, danych i ryzykach. W rezultacie zastosowanie RM4DT obniża ryzyko i podnosi efektywność podejmowania decyzji dotyczących wdrożenia BC. Tym samym RM4DT stanowi kompleksową odpowiedź na postawiony na wstępie problem i pytania badawcze.

Zaproponowany model gotowości przedsiębiorstw do wdrożenia bliźniaka cyfrowego RM4DT realizuje wszystkie wskazane w fazie koncepcyjnej dysertacji dodatkowe cele badawcze w następujący sposób:

- a) w drodze badań opracowano trzy wymiary aktywności przedsiębiorstw, wpływające na powodzenie wdrożenia;
- b) zidentyfikowano w analizie literatury, a następnie poddano walidacji z udziałem przedsiębiorców, parametry oceny stanu przedsiębiorstwa w wymiarach dotyczących wdrożenia BC;
- c) dokonano kwantyfikacji poziomów ryzyka i efektywności wdrożenia bliźniaka cyfrowego.

7.1 Odpowiedzi na pytania badawcze i wnioski

W toku badań wypracowane zostały odpowiedzi na sformułowane w fazie koncepcyjnej pytania badawcze:

- PB1. Jakie wymiary gotowości przedsiębiorstw decydują o zasadności wdrożenia bliźniaka cyfrowego?
- PB2. Czym jest dojrzałość przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi?
- PB3. Jakie parametry można wyróżnić w zakresie gotowości danych, gotowości technologii i dojrzałości zarządzania danymi?
- PB4. Jak ocenić stan gotowości przedsiębiorstwa w kontekście wdrażania cyfrowego bliźniaka?

PB5. Jak poprawić użyteczność wyników oceny gotowości przedsiębiorstwa w kontekście wdrażania BC?

Opracowane w toku badań odpowiedzi na wymienione powyżej pytania badawcze przedstawiono w sekcjach 7.1.1 – 7.1.5.

7.1.1 Wymiary gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia bliźniaka cyfrowego

Decydując o fakcie, skali i scenariuszu wdrożenia BC należy uwzględnić więcej niż jeden wymiar gotowości przedsiębiorstwa. W fazach koncepcyjnej i poznawczej dysertacji przedstawiono podejścia i wymiary stosowane w Przemysle 4.0 oraz innych obszarach zastosowań zaawansowanych systemów informatycznych. Dominacja wymiarów technicznych w istniejących modelach przeplata się w literaturze i praktyce biznesowej z szerokim spektrum wymiarów aktywności przedsiębiorstw, uznawanych za kluczowe dla powodzenia wdrożenia. Model RM4DT łączy w jednej strukturze odrębnie dotąd traktowane wymiary, koncentrując uwagę przedsiębiorstwa na niewielkiej liczbie parametrów. Jak wynika z przeprowadzonych badań, o zasadności wdrożenia BC decydują następujące wymiary gotowości:

- a) Wymiar A – gotowość technologii w przedsiębiorstwie,
- b) Wymiar B – dojrzałość zarządzania danymi,
- c) Wymiar C – gotowość danych.

7.1.2 Dojrzałość przedsiębiorstwa do zarządzania danymi w modelu RM4DT

W odróżnieniu od istniejących modeli dojrzałości i gotowości, których rozdzielne traktowanie w literaturze powoduje niechęć przedsiębiorstw do stosowania w praktyce biznesowej, w modelu RM4DT wiedza nt. dojrzałości przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi nie stanowi końcowego efektu zastosowania modelu. Przeciwnie, wiedza ta stanowi źródło danych wejściowych, służących prowadzonej podczas stosowania RM4DT ocenie stanu gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC. W tym kontekście, dojrzałość przedsiębiorstwa w zakresie zarządzania danymi zdefiniowano jako wydajność, z jaką przedsiębiorstwo generuje wartość dodaną w oparciu o dane. Tak rozumiana dojrzałość obejmuje siedem wymienionych w podrozdziale 7.1.3 parametrów które łącznie stanowią w RM4DT jeden z trzech wymiarów, decydujących o zasadności wdrożenia.

7.1.3 Parametry wymiarów gotowości przedsiębiorstwa w modelu RM4DT

Jak przedstawiono w poprzednich rozdziałach, spektrum parametrów w istniejących modelach waha się od trzech do ponad dwustu. O ile niewielka liczba analizowanych parametrów nie daje dostatecznego obrazu stanu przedsiębiorstwa, o tyle ich nadmiar hamuje, zamiast wspierać, podjęcie decyzji o rozpoczęciu wdrożenia BC. RM4DT wyróżnia 21 parametrów gotowości w wymiarach gotowości technologii (A), dojrzałości zarządzania danymi (B), gotowości danych (C). Są to:

a) Parametry wymiaru gotowości technologii (A):

- PA1 Użyteczność i intuicyjność – wpływ na łatwość rozpoczęcia korzystania
- PA2 Wierność odzwierciedlenia – wpływ na wiarygodność otrzymywanych wyników
- PA3 Zewnętrzne narzędzia i dane – wpływ na możliwość integracji
- PA4 Autoanaliza – wpływ na wykorzystanie w różnych obszarach aktywności
- PA5 Angażowanie partnerów/klientów – wpływ na rozwój relacji z otoczeniem
- PA6 Integralność – wpływ na niezawodność i efektywność
- PA7 Adaptacyjność – wpływ na łatwość wprowadzania zmian

Parametry wymiaru gotowości technologii określają zakres i stopień zmian dotyczących technologii, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić przed uruchomieniem i eksploatacją BC.

b) Parametry wymiaru dojrzałości zarządzania danymi (B):

- PB1 Pozyskiwanie i zarządzanie – wpływ na stabilność wdrożenia
- PB2 Analizowanie rynku i trendy – wpływ na zasadność i obszary wdrożenia
- PB3 Obsługa nowych zastosowań i skuteczność – wpływ na czas i zakres wdrożenia
- PB4 Podejmowanie decyzji i wiarygodność – wpływ na spójność i trafność wyników
- PB5 Zabezpieczanie i etyka – wpływa na ryzyka prawne i finansowe
- PB6 Rozwój innowacji i eksperymenty – wpływ na potencjał innowacyjny
- PB7 Włączenie cyfrowe i kultura organizacji – wpływ na kulturę organizacji

Parametry wymiaru dojrzałości zarządzania danymi określają zakres i stopień zmian dotyczących zarządzania danymi, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić przed uruchomieniem i eksploatacją BC.

c) Parametry wymiaru gotowości danych (C):

- PC1 Kompletność i spójność – wpływ na wiarygodność wyników
- PC2 Interoperacyjność – wpływ na potencjał integracji z istniejącymi systemami
- PC3 Gęstość / intensywność – wpływ na częstotliwość aktualizacji
- PC4 Dostępność / wykrywalność – wpływ na koszt przygotowania wdrożenia
- PC5 Aktualność / częstotliwość – wpływ na dynamikę adaptacji
- PC6 Wiarygodność danych – wpływ na trafność decyzji
- PC7 Prywatność – wpływ na czas wdrożenia i ryzyka prawne

Parametry wymiaru gotowości danych określają zakres i stopień zmian dotyczących danych, jakie przedsiębiorstwo powinno przeprowadzić przed uruchomieniem i eksploatacją BC.

7.1.4 Ocena stanu gotowości przedsiębiorstwa przy użyciu modelu RM4DT

Jak przedstawiono w fazie projektowej rozprawy, wsparcie decyzji o wdrożeniu BC wymaga oceny stanów gotowości przedsiębiorstwa w podziale na stan zastany (aktualny), stan gotowości do uruchomienia wdrożenia (aktualny bądź przyszły), który może być jednaki ze stanem zastanym oraz stan docelowy (przyszły). W tym kontekście, model RM4DT identyfikuje stany Zero, Alfa, Beta gotowości przedsiębiorstwa do wdrożenia BC, gdzie:

- a) Stan Zero (GA_x) – stan zastany przedsiębiorstwa – brak gotowości,
- b) Stan Alfa (GA_v) – stan gotowości do uruchomienia wdrożenia BC,
- c) Stan Beta (GA_y) – stan gotowości do doskonalenia w oparciu o BC.

7.1.5 Poprawa użyteczności wyników oceny stanu gotowości przedsiębiorstwa

W myśl zarysowanego w fazie koncepcyjnej rozprawy przedmiotu badań, model RM4DT służy poprawie użyteczności wyników oceny gotowości. Poza stanami gotowości RM4DT pomaga określić efektywność (E), ryzyko (R) i adekwatność (A) wdrożenia BC jeszcze przed rozpoczęciem wdrożenia, a także wytycza wektory zmiany stanu gotowości w kluczowych wymiarach gotowości.

W rezultacie zastosowania modelu RM4DT do określenia efektywności, ryzyka i adekwatności, przedsiębiorstwo może:

- a) rozpocząć wdrożenie / zrezygnować z wdrożenia,

- b) poprawić stan gotowości we wskazanych wymiarach i we wskazanym stopniu,
- c) zmodyfikować parametry wdrożenia we wskazanych wymiarach i/lub stanach.

Podsumowując, w wyniku przedstawionych w rozprawie pięciu faz badań osiągnięto wszystkie przewidziane w fazie koncepcyjnej cele pośrednie i wypracowano odpowiedzi na wszystkie pytania badawcze. Realizacja celów pośrednich i wypracowanie odpowiedzi na postawione w fazie koncepcyjnej pytania badawcze było niezbędne do osiągnięcia celu głównego, jakim było opracowanie modelu gotowości przedsiębiorstw do wdrażania bliźniaka cyfrowego. Rezultat głównego celu dysertacji stanowi model RM4DT, który zawiera w sobie efekty celów pośrednich i uwzględnia wypracowane w drodze badań odpowiedzi na pytania badawcze.

7.2 Kierunki dalszych badań

W rozprawie przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy w obszarze wdrażania bliźniaka cyfrowego w przedsiębiorstwie, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów gotowości przedsiębiorstwa, jego danych, technologii oraz procesów zarządzania danymi. Celem uwiarygodnienia możliwości wykorzystania modelu w praktyce, przeprowadzono badania w ujęciu praktycznym z udziałem przedsiębiorstw, weryfikujące trafność i poprawność merytoryczną oraz semantyczną proponowanych pojęć, wymiarów, parametrów i procesów.

Model gotowości RM4DT, opracowany w oparciu o tę analizę, został poddany walidacji w trzech przedsiębiorstwach. Główny wkład do dorobku nauk o zarządzaniu i jakości stanowi model gotowości RM4DT oraz szereg powiązanych z modelem elementów nowej wiedzy, takich jak:

- a) model formalny, umożliwiający szacowanie współczynników adekwatności oraz efektywności, których brak jest wskazywany w literaturze jako poważna słabość dotychczasowych modeli dojrzałości i gotowości;
- b) model graficzny, pozwalający wytyczać i wizualizować stany gotowości oraz wektory zmian stanów gotowości przedsiębiorstwa;
- c) uporządkowanie cech oraz kryteriów klasyfikacji systemu jako bliźniaka cyfrowego obiektowego lub procesowego;
- d) zastosowanie metod, wywodzących się z nauk technicznych, jak relacyjna baza danych oraz ontologie semantyczne, do uporządkowania procesów zarządzania danymi, wykorzystywanymi przez bliźniaka cyfrowego.

Wielowymiarowy i uniwersalny charakter modelu RM4DT został wypracowany w wyniku objęcia badaniami perspektywy, wykraczającej poza dyscyplinę nauk o zarządzaniu i jakości oraz konfrontacji wyników badań teoretycznych z ujęciem praktycznym.

Dalsze badania wymagają pogłębienia analizy relacji między obiektami, procesami i parametrami w warstwach wirtualnej i fizycznej. Zaproponowany model, skale, wymiary i parametry wymagają szerszej walidacji w przedsiębiorstwach różnej wielkości obrotów i zatrudnienia, różnej sytuacji ekonomicznej i w różnych trybach wykorzystania (procesowy, obiektowy, hybrydowy). Szczególną uwagę należy zwrócić na analizę efektywności w ujęciu finansowym i opłacalności ekonomicznej planowanego wdrożenia BC.

W perspektywie najbliższych miesięcy niezbędna będzie ewaluacja modelu RM4DT w odniesieniu do gwałtownie postępującego zaawansowania technologicznego i cyfrowego przedsiębiorstw, dynamicznej ewolucji praktykowanych modeli biznesowych i odnośnych standardów, jak również upowszechnieniem się niedostępnych dotychczas narzędzi Przemysłu 4.0 i BC, jak np. komputer kwantowy, którego użycie może diametralnie zmienić czas i koszty wdrażania BC, powodując konieczność ponownej walidacji modelu RM4DT.

W zakresie strategicznego zarządzania przedsiębiorstwem istotne będzie ustalenie warunków i parametrów funkcjonowania przedsiębiorstwa z perspektywy przetwarzania danych. W tym ujęciu istotna będzie koncentracja badań na aspekcie wydajności dominujących aktualnie w literaturze strategii zarządzania danymi. Wyniki tych badań powinny stanowić uzupełnienie modelu RM4DT w zakresie wspierania decyzji o wyborze pomiędzy powszechnie praktykowaną statyczną strategią zarządzania danymi a strategią dynamiczną, którą cechuje wyższy koszt wdrożenia, ale też wyższym potencjał wykorzystania BC.

Z perspektywy wsparcia podejmowania decyzji, ważnym kierunkiem będzie zbadanie możliwości stosowania modelu RM4DT w trakcie wdrażania i eksploatacji BC. Możliwość bieżącego, dynamicznego monitorowania statusu wdrożenia BC na modelu graficznym, w oparciu o dane aktualizowane w czasie rzeczywistym, może w znaczący sposób wesprzeć bieżące zarządzanie przedsiębiorstwem.

Obiecującym kierunkiem dalszych badań, jakie w dalszej pracy zamierza podjąć autor dysertacji, jest analiza zasadności i możliwości standaryzacji modelu RM4DT, m.in. względem norm ISO, w tym standaryzacja procesów i polityk gromadzenia i porównywania statystycznego danych historycznych. Opracowanie metodyki gromadzenia i porównywania ustandaryzowanych danych, pochodzących od przedsiębiorstw stosujących model RM4DT, powinno dostarczyć nowej wiedzy i nowych możliwości w zakresie prognozowania wyników, jakie przedsiębiorstwa mogą otrzymywać w wyniku wdrażania BC.

SPIS LITERATURY I STRON INTERNETOWYCH

- [1] Abraham R., Schneider J., Brocke J., Data governance: A conceptual framework, structured review, and research agenda, [w:] *International Journal of Information Management*, nr 49, 2019, s. 424-438.
- [2] Ackoff R.L., From data to wisdom [w:] *Journal of applied systems analysis*, 1989, s. 3-9.
- [3] Adam T., Ambrosio da Silva I., Barbalho S., Felippes B., Heine I., Schmitt R., 3D-CUBE readiness model for industry 4.0: technological, organizational, and process maturity enablers [w:] *Production & Manufacturing Research*, nr 10, 2022, s. 875-937.
- [4] Alexander D., Lyytinen K., *Organizing successfully for big data to transform organizations*, 2017.
- [5] Al-Doori M., Bradley P.E., Breunig M. i in., *Geospatial Data Management Research: Progress and Future Directions*, 2020.
- [6] Anderl R., Gausemeier J., Hompel M., Schuh G. i Wahlster W., *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies*, Monachium, 2018.
- [7] Arbter M., Haße H., Henning J.L., Möller F., Otto. B. i Valk H., *A Taxonomy of Digital Twins - Completed Research*, 2020.
- [8] Ardagna C.A., Ceravolo P., Damiani, E., Big data analytics as-a-service: issues and challenges, [w:] *2016 IEEE International Conference On Big Data (Big Data)*, 2016, s. 3638–3644.
- [9] Armenakis A.A., Feild H.S., Harris S.G., Holt D.T., Readiness for Organizational Change: The Systematic Development of a Scale [w:] *The Journal of Applied Behavioral Science*, nr 43(2), 2007, s. 232–255.
- [10] Auer M., Fendrich S., Kowatsch F., Loos L., Marx S., Mocnik F.B., Przybill K., Raifer M., Troilo R., Zipf A., *A Framework for Spatio-Temporal Analysis of OpenstreetMap History Data*, 2019.
- [11] Aurich J., Siedler C., Sinnwell C., *Maturity model for product development information*, 2019.
- [12] Azevedo A., Martins C.T., Pinto H.S. i in., *Towards an ontology mapping process for business process composition* [w:] *Innovation in manufacturing networks*, Springer, Boston, 2008, s. 169–176.
- [13] Azevedo M., Silva H.D., Soares A.L., *A Vision for a Platform-based Digital-Twin Ecosystem*, 2021, s. 761-766.

- [14] Bahim C., Casorrán-Amilburu C., Dekkers M., Herczog E., Loozen N., Repanas K., Stall S., The FAIR Data Maturity Model: An Approach to Harmonise FAIR Assessments [w:] Data Science Journal, nr 19, 2020.
- [15] Baldassarre J., Patón-Romero D., Piattini M., Rodríguez M.T., Maturity model based on CMMI for governance and management of Green IT, 2019, 555-563.
- [16] Bao Q., Dai S., Wang W., Yu Y., Zhao G., Ontology-based modeling of part digital twin oriented to assembly, 2020.
- [17] Barbosa L., Brous P., Estevez E., Janowski T., Janssen M., Data governance: Organizing data for trustworthy Artificial Intelligence [w:] Government Information Quarterly, nr 37, 2020.
- [18] Barkallah M., Boulanger Z.C., Haddarb M. (Eds.), Uncertainty of key performance indicators for Industry 4.0: A methodology based on the theory of belief functions [w:] Computers in Industry nr 140/2022, s. 2-15.
- [19] Barlow C., Day C., Fan Z., Fuller A., Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, [w:] IEEE Access, nr 8, 2020.
- [20] Bartley N., Best M., Butow P., Napier Ch., Patient experience of uncertainty in cancer genomics: a systematic review [w:] Genetics in Medicine, nr 22, 2020, s. 1450-1460.
- [21] Batini C., Scannapieco M., Methodologies for Information Quality Assessment and Improvement, Data and Information Quality, 2016, 253-402.
- [22] Bertenrath R., Bleider M., Blum M., Lichtblau K., Millack A., Schmitt K., Schmitz E., Schröter M., Stich V., IMPULS-Industrie 4.0-Readiness, Aachen-Kolonia, 2015.
- [23] Bhujang R.K., Graphical visualization of risk assessment for effective risk management during software development process, 2012.
- [24] Bibby L., Dehe B, Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defence sector [w:] Production Planning & Control, nr 29, 2018.
- [25] Bilanova Z., Novitzka V., Perhac J., Steingartner W., Formal Model of IDS Based on BDI Logic, 2021.
- [26] Błaszczyk M., Metody teoretyczne przewidywania struktury białek oraz ich kompleksów z peptydami, Warszawa, 2015.
- [27] Borbinha J., Proenca D., Maturity Models for Data and Information Management [w:] Digital Libraries for Open Knowledge, Springer, 2018.
- [28] Bosch J., Elsner Ch., Figalist I., Olsson H., Breaking the vicious circle: A case study on why AI for software analytics and business intelligence does not take off in practice [w:] Journal of Systems and Software, nr 184, 2022.

- [29] Boschert S., Heinrich C., Rosen R., Next generation digital twin, Las Palmas, Hiszpania, 2018, s. 209–217.
- [30] Bourdeau S., Hadaya P., Labissiere A., Marchildon P., Data governance maturity assessment tool: A design science approach, 2018, 155-193.
- [31] Brotby C., Capability maturity model, 2009, s. 201-203.
- [32] Broyd T, Chen K., Jiang F, (Eds.), Digital twin and its implementations in the civil engineering sector, Automation in Construction, 2021.
- [33] Bruke E., Curry E., Derguech W., An autonomic approach to real-time predictive analytics using open data and internet of things, [w:] 2014 IEEE 11th Intl Conf On Ubiquitous Intelligence and Computing, 2014, s. 204–211.
- [34] Caballero I., Kim S., Lee D., Pérez-Castillo R., Organizational process maturity model for IoT data quality management, [w:] Journal of Industrial Information Integration, nr 26, 2022.
- [35] Cannon S., Gupta U., Data Governance Maturity Models. A Practitioner’s Guide to Data Governance, 2020, 143–165.
- [36] Capurro D., Yetisgen M., van Eaton E., Black R., Tarczy-Hornoch P., Availability of structured and unstructured clinical data for comparative effectiveness research and quality improvement: a multisite assessment, Washington DC, 2014.
- [37] Carpendale S., Neumann P., Schlechtweg S., ArcTrees: Visualizing Relations in Hierarchical Data, 2005.
- [38] Chang J., Lan Z., Cheng Ch., Wei Y., Data Uncertainty Learning in Face Recognition, 2020, s. 5710-5719.
- [39] Chai X., Wen Y., Yan X., Zhou Y., Qualitative and Quantitative Integrated Modeling for Stochastic Simulation and Optimization, 2013.
- [40] Chen K., Chen W., Jiang J., Li Z., Liu X., Weng H., Wu Sh., Zheng Q., Development of a deep learning-based image quality control system to detect and filter out ineligible slit-lamp images: A multicenter study [w:] Computer Methods and Programs in Biomedicine, nr 203, 2021.
- [41] Chen Y., Yang O., Sampat C., Bhalode P., Ramachandran R., Ierapetritou M., Digital twins in pharmaceutical and biopharmaceutical manufacturing: a literature review [w:] Processes, nr 8, 2020.
- [42] Cheng J., Qi Q., Sui F. i in., Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [w:] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nr 94, 2018, s. 3563–3576.

- [43] Cheng G., Gao Z., Li Y., Liu X., Cloud data governance maturity model [w:] 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2017, s. 517-520.
- [44] Chomsky N., Aspects of the theory of syntax, MIT Press, Cambridge, 1965, s. 51.
- [45] Codd E.F., Relational database: a practical foundation for productivity [w:] ACM Turing award lectures, Association for Computing Machinery, New York, USA, 2007.
- [46] Coombs C.H., A theory of data, Wiley, 1964.
- [47] Crawford J., Project management Maturity Model, USA, 2021.
- [48] Crespi N., Lee G.M., Minerva R., Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models, 2020, s. 1785-1824.
- [49] Cronemyr P., Danielsson M., Process Management 1-2-3 – a maturity model and diagnostics tool, Quality Technology and Management, Sweden, 2013.
- [50] Curtis B., Gardiner T. i Weber C., Business process maturity model (BPMM) Version 1.0 [w:] Business Process Trends, 2006, s. 496.
- [51] De Carolis A., Macchi M., Negri E., Terzi S., A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies [w:] Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. IFIP Advances in Information and Communication Technology, nr 513, 2017.
- [52] Deloitte, Trendy Technologiczne, 2023.
- [53] Denyer D., Tranfield D., Producing a systematic review, 2009.
- [54] Ding G., Fu J., Jiang H., Qin S., Zhang J., How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application [w:] Journal of Manufacturing Systems, nr 58, 2021, s. 36-51.
- [55] Domański R., Oleśków-Szłapka J., Pawłowski G., Wojciechowski H., Logistics 4.0 Maturity Levels Assessed Based on GDM (Grey Decision Model) and Artificial Intelligence in Logistics 4.0 - Trends and Future Perspective [w:] Procedia Manufacturing, nr 39, 2019.
- [56] Donley M., Welsh M., Morin J. (Eds), Global Horizons Final Report: United States Air Force Global Science and Technology Vision, USA, 2013.
- [57] Drąg, P., Kamińska A.M., Nowak, M.U., Pomiar korzyści wynikający z geoinnowacji na przykładzie budowy modelu obiektu [w:] Innowacje a dobrostan społeczeństwa i gospodarki, s. 93-119.

- [58] Ebrahimi A., Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators [w:] IEEE 28th international symposium on industrial electronics, 2019, s. 1059-1066.
- [59] Eckartz S., Hofman W., Van Veenstra A., A Decision Model for Data Sharing, Electronic Government, 2014, 253-264.
- [60] Edeki C., Flowers R., Business process modeling notation [w:] International Journal of Computer Science and Mobile Computing, nr 2, 2013, s. 35-40.
- [61] Enders M., Hossbach N., Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review, 2019.
- [62] Eren P.E., Gökalp E., Gökalp M.O., Kayabay K., Koçyiğit A., Data science roadmapping: An architectural framework for facilitating transformation towards a data-driven organization, [w:] Technological Forecasting and Social Change, nr 174, 2022.
- [63] Eren P.E., Gökalp M.O., Kayabay K., Koçyiğit A., Neely A., Zaki M., Open-source big data analytics architecture for businesses, 2019, s. 1–6.
- [64] Erkoyuncu J., Fowler K., Gadd P., Higgins N., Reynolds D., Shehab E., Singh S., Towards effective data management for digital twin [w:] Advances in Manufacturing Technology, nr 33, 2019, s. 167-172.
- [65] Erkoyuncu J., Fowler K., Gadd P., Higgins N., Reynolds D., Shehab E., Singh S., Data management for developing digital twin ontology model, 2020.
- [66] Erol T., Mendi A., Dogan D., The digital twin revolution in healthcare [w:] 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 2020, s. 1-7.
- [67] Exner K., Zimpfer R., Stark R., Maturity Model and Action Recommendation: A PSS Capability Self-Assessment Tool for Companies [w:] Procedia CIRP, nr 64, 2017, s. 175-180.
- [68] Fernández-Solís J., The systemic nature of the construction industry, 2008.
- [69] Forrest J., Liu S., The Current Developing Status on Grey System Theory [w:] The Journal of Grey System, Nanjing, 2007, s. 115-116.
- [70] Freiberger S., Lehmann Ch., Schock Ch., (Eds.), (2017), The Digital Twin: Demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. Procedia Manufacturing nr 9, 113-120.
- [71] Gal U., Jensen T.B. i Stein M.K., Breaking the vicious cycle of algorithmic management: A virtue ethics approach to people analytics [w:] Information and Organization, nr 30, 2020.

- [72] Gash D.C., Orlikowski W.J., Technological frames: making sense of information technology in organizations [w:] *ACM Transactions on Information Systems*, nr 12, 1994, s. 174-207.
- [73] Geris L., Van Sint J.S., Modelling towards a more holistic medicine: The Virtual Physiological Human (VPH), 2019, s. 127-130.
- [74] Golightly D., Kefalidou G., Sharples S., A cross-sector analysis of human and organisational factors in the deployment of data-driven predictive maintenance, [w:] *Information Systems E-Business Management*, nr 16, 2018, s. 627-648.
- [75] Golinska-Dawson P., Werner-Lewandowska K., Kolinska K., Kolinski A., Impact of Market Drivers on the Digital Maturity of Logistics Processes in a Supply Chain, *Sustainability* 2023, nr 15, s. 3120.
- [76] Govil S., Qu S., Leckie J., Wang J., Optimized Adaptive Scheduling of a Manufacturing Process System with Multi-skill Workforce and Multiple Machine Types: An Ontology-based, Multi-agent Reinforcement Learning Approach [w:] *Procedia CIRP*, nr 57, 2016, s. 55-60.
- [77] Green M., *Levels of Adequacy, Observational, Descriptive, Explanatory*, Elsevier Ltd., Brighton, 2006.
- [78] Grieves M., *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, 2003.
- [79] Grobelak M., *Okazje rynkowe a wiedza we współczesnym przedsiębiorstwie* [w:] *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, Politechnika Częstochowska, 2021.
- [80] Handika D., Ruldeviyani Y., Saputra D.A., Data Governance Maturity Model (DGM2) Assessment in Organization Transformation of Digital Telecommunication Company: Case Study of PT Telekomunikasi Indonesia, 2018, s. 325-330.
- [81] Hautala J., *Can robots possess knowledge? Rethinking the DIK(W) pyramid through the lens of employees of an automotive factory*, 2021.
- [82] Henjes J., Karner M., Kritzinger W., Sihh W., Traar G., *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*, 2018, s. 1016-1022.
- [83] Henney A., Morley-Fletcher E. i Viceconti M., *In silico clinical trials: how computer simulation will transform the biomedical industry*, *International Journal of Clinical Trials*, 2016, s. 37-46.
- [84] Hirshorn S., Jefferies S., *Final report of the NASA Technology Readiness Assessment (TRA) study team*, Waszyngton, 2016.

- [85] Hoteit I., Katterbauer K., Sun S., Synergizing EM and seismic data attributes for enhanced forecasts of reservoirs, 2014, Pages 396-410.
- [86] Hu H., Li L., Pan C., Wang J., Zhou Y., Scheduling dual-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints [w:] IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, nr 7, 2020, s. 776-789.
- [87] Husam B., Tugrul D., The use of readiness assessment for big data projects [w:] Sustainable Cities and Society, nr 60, 2020.
- [88] Hutchinson A., Finnemore M., Standardized process improvement for construction enterprises [w:] Total Quality Management, nr 10, s. 576-583.
- [89] Jaco R., Developing an IS/ICT management capability maturity framework, Stellenbosch, South Africa, 2004.
- [90] Javed, A., Jun W., Khattak, A., Nasir M.H., Yasir, M., Yousaf Z. i Shirazi S.H., Innovation performance in digital economy: does digital platform capability, improvisation capability and organizational readiness really matter? [w:] European Journal of Innovation Management, nr 25, 2022, s. 1309-1327.
- [91] Jain R., Joshi R., Rathore A.P., Wagire A.A., Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice [w:] Production Planning & Control, nr 32, 2021.
- [92] Jayanetti J., Perera B., Waidyasekara K., Defining a ‘maturity model’ in the construction context: A systematic review, Sri Lanka, 2022.
- [93] Jia W., Wang W., Zhang Z., From simple digital twin to complex digital twin Part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin [w:] Advanced Engineering Informatics, nr 53, 2022.
- [94] Johnk J., Weißert M., Wyrski K., Ready or Not AI Comes — An Interview Study of Organizational AI Readiness Factors, Business Information Systems Engineering, nr 63, 2021, s. 5–20.
- [95] Jurkiewicz Z., Matematyka stosowana: Bazy danych, Warszawa, 2013.
- [96] Karakra A., Fontanili F., Lamine E., Lamothe J., HospiT'Win: a predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital [w:] IEEE EMBS international conference on biomedical & health informatics, 2019, s. 1-4.
- [97] Keith K.L., The Development and Analysis of a Perceived Readiness for Change Measure as Part of an Organizational Change Process, The University of Utah, 1986.
- [98] Kiran D.R., Production Planning and Control, 2019.

- [99] Kitchenham B., Procedures for performing systematic reviews, Keele University, Wielka Brytania, nr 33, 2004, s. 2-8.
- [100] Ko R.K.L., Lee S.S.G. i Wah Lee E., Business process management (BPM) standards: a survey [w:] Business Process Management Journal, nr 15, 2009, s. 744-791.
- [101] Kosacka-Olejnik M., Kostrzewski M., Marczevska M., Mrówczyńska, B., Pawlewski P., How Digital Twin Concept Supports Internal Transport Systems?, Energies, 2021.
- [102] Kukartsev V. i in., Features of evaluating the effectiveness of industrial enterprise marketing activities, 2020.
- [103] Kwan A., Muttreja V., Schrage M., Measuring Up Digital Strategy, MIT Sloan Management Review, 2022.
- [104] Lacerda T., Wangenheim Ch.G., Systematic literature review of usability capability/maturity models [w:] Computer Standards & Interfaces, nr 55, 2018, s. 95-105.
- [105] Lemmerman L. A., Seablom M.S., Measuring technology maturity and readiness for mission infusion, [w:] IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, s. 5646-5649.
- [106] Liebenberg, M., Jarke, M., Information Systems Engineering with Digital Shadows: Concept and Case Studies [w:] Advanced Information Systems Engineering. Springer, 2020.
- [107] Longo F., Padovano A., Felice F., Petrillo A. i Elbasheer M., From “prepare for the unknown” to “train for what's coming”: A digital twin-driven and cognitive training approach for the workforce of the future in smart factories, [w:] Journal of Industrial Information Integration, nr 32, 2023.
- [108] Lu Q., Parlikad A., Woodall P., Ranasinghe G., Xie X., Liang Z., Konstantinou E., Heaton J., Schooling J., Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus, Cambridge, 2020.
- [109] Luiz F. i in., Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0, Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0, 2018, s. 204-214.
- [110] Mankins, J., Technology Readiness Levels: A White Paper, NASA Office of Space Access and Technology, Waszyngton, 1995.
- [111] Mansoor A.S., Mohd H., Nor L.A., Industry 4.0 Readiness Models: A Systematic Literature Review of Model Dimensions, Malaysia, 2020.
- [112] McAloone T., Pigosso D., Making the transition to a Circular Economy within manufacturing companies: the development and implementation of a self-assessment readiness tool, [w:] Sustainable Production and Consumption, nr 28, 2021, s. 346-358.

- [113] McKinsey, Polska jako Cyfrowy Challneger, 2018.
- [114] Machado C.G., Winroth M., Carlsson D., Almström P., Centerholt V. i Hallin M., Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization., [w:] Procedia CIRP, nr 81, 2019, s. 1113-1118.
- [115] Mierzwiak R., Metoda zarządzania jakością warunków pracy w przedsiębiorstwie produkcyjnym, 2015.
- [116] Monnerot J., Les faits sociaux ne sont pas des choses, Paris, 1946.
- [117] Monostori L., Pfeiffer A., Popovics G., Generic data structure and validation methodology for simulation of manufacturing systems, 2016.
- [118] Neagu D., Fu X., Wojak A. i in., Data governance in predictive toxicology: A review, Cheminform 3, 24, 2011, s. 7-14.
- [119] Nousak P., Phelps R., Hill C., A Scorecard approach to improving Data Quality, Data Warehousing and Enterprise Solutions, 2001.
- [120] Olszewski A., Feasibility for cloud based simulation services hub to accelerate the servitization processes in smart factories, 2016, s. 7.
- [121] Ostasevicius V., Digital twins in manufacturing [w:] 13th conference on data analysis methods for software systems, Lithuania, 2022.
- [122] Ozkaya I., What is really different in engineering ai-enabled systems?, 2020, s. 3-6.
- [123] Oxford English Dictionary, Oxford University Press, 2022.
- [124] Paquet G., Crippling Epistemologies and Governance Failures: A Plea for Experimentalism, 2009.
- [125] Pawlewski P., Olszewski A., Integration of Digital Twin with Simulation in Order to Meet Factory Expectations, [w:] Computational Methods in Science and Technology, nr 27, 2021.
- [126] Read J.R.L., Data uncertainty, Chile, 2009.
- [127] Ren S., Optimization of Enterprise Financial Management and Decision-Making Systems Based on Big Data, Journal of Mathematics, China, 2022.
- [128] Rowley J., The wisdom hierarchy, 2007.
- [129] Samuel H, Two qualified models of learning by doing [w:] Journal of Economics and International Finance, nr 12, s. 130-141.
- [130] Siemens, Digi Index, 2021.
- [131] Singh V, Willcox K.E., Engineering Design with Digital Thread, Aerospace Research Central, USA, 2018

- [132] Sliż P., Dojrzałość procesowa organizacji-wyniki badań empirycznych [w:] Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław, 2016.
- [133] Software Engineering Institute, CMMI for Development Version 1.2, Pittsburgh, 2006.
- [134] Sonmez V., Testik C.M. i Testik M.O., Overall equipment effectiveness when production speeds and stoppage durations are uncertain [w:] Advanced Manufacturing Technologies, Springer-Verlag London Ltd., Londyn, 2017, s. 121–130.
- [135] Stich V., Gudergan G. i Zeller V., Need and Solution to Transform the Manufacturing Industry in the Age of Industry 4.0 – A Capability Maturity Index Approach, Springer Nature Switzerland AG, 2018, s. 33-49.
- [136] Succar B., Building information modelling maturity matrix [w:] Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies, IGI Global, 2010, s. 65-103.
- [137] Tao F., Zhang M., Nee A., Digital twin driven smart manufacturing, Academic Press, 2019.
- [138] Weiner B.J., A theory of organizational readiness for change, Implementation Sci, nr 4, 2009.
- [139] Werner-Lewandowska K., Radecki A., Więcek-Janka E., European Research Studies Journal, nr 25, 2022, s. 204-214.
- [140] West T., Blackburn M., Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD's Latest Manhattan Project, Procedia Computer Science, 2017, 47–56.
- [141] White S.A., Introduction to BPMN, IBM Corporation, 2004.
- [142] Więcek-Janka E., Werner-Lewandowska K., Radecki A., Expert's Model of Managerial Competencies for Engineer 4.0 (EMMCE), Management and Production Engineering Review, nr 14, 2023, s. 87–104.
- [143] Williams G., PRINCE2 maturity model, Londyn, 2010.
- [144] Wu J., Wang X., Dang Y., Lv Z., Digital twins and artificial intelligence in transportation infrastructure: classification, application, and future research directions [w:] Computers and Electrical Engineering, 2022.
- [145] www.bpm-plus.org/readiness-assessment-maturity-model.htm, 12.12.2022.
- [146] www.hesa.ac.uk/support/tools/data-capability/query, 19.08.2022.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Cykl badawczy prezentowany w dysertacji.....	25
Rys. 1.2. Struktura dysertacji	29
Rys. 2.1. Procedura przeglądu literatury	31
Rys. 2.2. Wynik wyszukiwania słów ‘digital twin’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu.....	35
Rys. 2.3. Wynik wyszukiwania słów ‘digital twin’ i ‘readiness model’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu.....	36
Rys. 2.4. Wynik wyszukiwania słów ‘readiness model’ na linii czasu w obszarze nauk o zarządzaniu.....	36
Rys. 3.1. Ontologia semantyczna BC w środowisku przedsiębiorstwa – przykład teoretyczny.....	63
Rys. 4.1. Rozszerzona (odwrócona) piramida DIK.....	81
Rys. 4.2. Abstrakt graficzny transmisji i transformacji informacji, danych i wiedzy...	84
Rys. 4.3. Próbkki wyposażenia gromadzone celem cyfryzacji w laboratorium zaawansowanej wizualizacji	87
Rys. 4.4. Elementy wyposażenia podczas cyfryzacji w laboratorium zaawansowanej wizualizacji	88
Rys. 4.5. Przykłady wizualizacji danych o obiektach w poszczególnych aplikacjach odpowiadających odpowiednio za A) wymiary i formę obiektu, B) strukturę powierzchni materiału miękkiego, C) światło i cień materiału.....	90
Rys. 4.6. Przykład modelu cyfrowego, łączącego szereg plików, odpowiadających za poszczególne aspekty zachowania cyfryzowanego obiektu fizycznego.....	91
Rys. 4.7. Przykład obiektu, osadzonego w procesie aranżacji w zintegrowanym systemie zarządzania.....	92
Rys. 4.8. Przykład wizualizacji grupy obiektów w aranżowanej scenie, potencjalnie wygenerowany przez system AI.....	92
Rys. 5.1. Diagram przebiegu procesu podejmowania decyzji w modelu gotowości RM4DT.....	106
Rys. 5.2. Przykładowa przestrzeń zmiany stanu gotowości przedsiębiorstwa w modelu graficznym RM4DT.....	108

Rys. 6.1 Proces badania przeprowadzonego w przedsiębiorstwach usługowym, handlowym i produkcyjnym.....	118
Rys. 6.2. Model graficzny RM4DT gotowości przedsiębiorstwa usługowego.....	126
Rys. 6.3. Przykład modelu graficznego RM4DT dla przedsiębiorstwa handlowego.....	133
Rys. 6.4. Przykład modelu graficznego RM4DT dla przedsiębiorstwa produkcyjnego....	141
Rys. 6.5 Porównanie modeli graficznych RM4DT przykładowych przedsiębiorstw A, B , C.....	142
Rys. 6.6. Porównanie wektorów zmian stanów gotowości przykładowych przedsiębiorstw usługowego A, handlowego B i produkcyjnego	143

SPIS TABEL

Tab. 2.1 Wytyczne dotyczące opracowania kryteriów selekcji.....	32
Tab. 2.2. Kryteria selekcji słów kluczowych.....	33
Tab. 2.3. Wyniki drugiej fazy selekcji wyszukiwania publikacji.....	37
Tab. 3.1. Zestawienie definicji modelu dojrzałości.....	47
Tab. 3.2. Porównanie poziomów dojrzałości stosowanych w popularnych modelach dojrzałości.....	51
Tab. 4.1. Porównanie cech i funkcjonalności rodzajów bliźniaka cyfrowego.....	68
Tab. 4.2. Kryteria kwalifikacji systemu jako bliźniaka cyfrowego.....	71
Tab. 4.3. Cechy i funkcjonalności BC w podejściu obiektowym i procesowym.....	74
Tab. 5.1. Tabela poziomów gotowości do wdrożenia BC.....	110
Tab. 5.2. Tabela wymiarów gotowości.....	111
Tab. 5.3. Tabela parametrów (PA) gotowości technologii.....	111
Tab. 5.4. Tabela parametrów (PB) dojrzałości procesów zarządzania danymi.....	112
Tab. 5.5. Tabela parametrów (PC) gotowości danych w przedsiębiorstwie.....	112
Tab. 5.6. Tabela Adekwatności (A) nakładów planowanego wdrożenia do oczekiwanych korzyści.....	113
Tab. 5.7. Poziomy efektywności (E) wdrożenia bliźniaka cyfrowego.....	114
Tab. 5.8. Tabela ryzyka niepowodzenia wdrożenia BC.....	114
Tab. 5.9. Skala wpływu zmiany stanu gotowości na przedsiębiorstwo.....	116
Tab. 6.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa usługowego uczestniczącego w badaniu.....	119
Tab. 6.2. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie usługowym.....	120
Tab. 6.3. Ocena gotowości przedsiębiorstwa usługowego do wdrożenia BC.....	121
Tab. 6.4. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym.....	123
Tab. 6.5. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym.....	124
Tab. 6.6. Charakterystyka przedsiębiorstwa handlowego uczestniczącego w badaniu.....	127
Tab. 6.7. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie handlowym.....	127
Tab. 6.8. Ocena gotowości przedsiębiorstwa handlowego do wdrożenia BC.....	128

Tab. 6.9. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie usługowym.....	131
Tab. 6.10. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie handlowym.....	132
Tab. 6.11. Charakterystyka przedsiębiorstwa produkcyjnego uczestniczącego w badaniu	134
Tab. 6.12. Charakterystyka przedmiotu wdrożenia BC planowanego w przedsiębiorstwie produkcyjnym.....	135
Tab. 6.13. Ocena gotowości przedsiębiorstwa produkcyjnego do wdrożenia BC.....	136
Tab. 6.14. Przykład zastosowania tabeli zmiany stanu gotowości modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie produkcyjnym.....	138
Tab. 6.15. Przykład zastosowania tabeli adekwatności modelu formalnego RM4DT w przedsiębiorstwie produkcyjnym.....	139

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Załącznik 01. Formularz oceny stanu gotowości do wdrożenia BC.....	166
Załącznik 02. Formularz eksperckiej oceny gotowości cyfrowej przedsiębiorstwa.....	171

FORMULARZ OCENY STANU GOTOWOŚCI

Cel wypełnienia formularza

Formularz służy określeniu zakresu i skali działań, jakie Twoje przedsiębiorstwo powinno podjąć, aby wdrożenie bliźniaka cyfrowego przyniosło oczekiwane korzyści. Ponieważ wdrożenie zaawansowanego narzędzia cyfrowego wymaga zaangażowania wielu osób i działów przedsiębiorstwa, przed wdrożeniem należy **ocenić aktualny stan gotowości przedsiębiorstwa** w tych obszarach, które będą miały wpływ na powodzenie wdrożenia. Następnie należy **określić oczekiwany stan gotowości**, jaki przedsiębiorstwo zamierza osiągnąć, aby wdrożenie bliźniaka cyfrowego było efektywne i adekwatne do oczekiwanych korzyści. Dlatego w formularzu dokonasz oceny aktualnych i docelowych parametrów gotowości w trzech wymiarach:

- a) gotowości danych w przedsiębiorstwie,
- b) dojrzałości zarządzania danymi w przedsiębiorstwie,
- c) gotowości technologii w przedsiębiorstwie.

Co jest przedmiotem oceny w formularzu?

Przedmiotem oceny nie jest całe przedsiębiorstwo, a jedynie te obszary Twojego przedsiębiorstwa, których dotyczy planowane wdrożenie bliźniaka cyfrowego. Oceń tylko te działy i obszary aktywności przedsiębiorstwa, które będą faktycznie związane z wdrożeniem. Dla przykładu, planując wdrożenie bliźniaka cyfrowego w zakładzie montażu, nie oceniaj procesów, jakie obserwujesz w zakładzie spawania, nawet jeśli taka ocena byłaby wyższa.

CZĘŚĆ I – cel i zakres wdrożenia

Aby doprecyzować przedmiot i cel wdrożenia, odpowiedz jednym zdaniem na każde z pięciu pytań:

- 1) Jaki jest główny cel wdrożenia bliźniaka cyfrowego w Twoim przedsiębiorstwie?
Głównym celem wdrożenia bliźniaka cyfrowego w moim przedsiębiorstwie jest:

.....

Jeśli wolisz, możesz wybrać odpowiedź z listy:

- a. Przyspieszenie / podniesienie wydajności produkcji lub świadczenia usług
- b. Personalizacja – wytwarzanie usługi/produktu „szytego na miarę”
- c. Masowa kastomizacja – różnicowanie masowego produktu na życzenie klienta
- d. Decentralizacja – zamykanie cykli poszczególnych procesów produkcyjnych/usługowych w jak najmniejszych jednostkach operacyjnych zsynchronizowanych centralnie
- e. Kobotyzacja – wprowadzenie robotów współpracujących z operatorami ludzkimi
- f. Podniesienie wydajności świadczenia usług / produkcji
- g. Zwiększenie sprzedaży
- h. Podniesienie trafności decyzji finansowych w oparciu o bieżące monitorowanie i zarządzanie danymi
- i. Skrócenie czasu podejmowania decyzji finansowych/inwestycyjnych
- j. Skrócenie czasu *Time-to-market* nowych usług / produktów

- k. Podniesienie kompetencji cyfrowych w celu eliminacji błędów ludzkich w procesie zarządzania i obsługi danych
 - l. Automatyzacja – skrócenie czasu cykli, wykonywanych przez operatorów ludzkich
 - m. Integracja łańcucha wartości
 - n. Eliminacja odchyłeń od wymaganych parametrów w zakresie wybranych stanowisk pracy
 - o. Zmniejszenie zużycia energii
 - p. Bieżąca diagnostyka i predykcja zaburzeń procesów
 - q. Minimalizacja liczby i czasu nieplanowanych przestojów na wybranych stanowiskach roboczych
- 2) Jakie zbiory danych istnieją w Twoim przedsiębiorstwie, które mogą być przydatne w planowanym zakresie wdrożenia?

.....

3) Czy i gdzie są przechowywane te dane? Na papierze, laptopach, serwerze? W jednym, kilku komputerach, zakładach, działach, biurach, archiwum?

.....

4) Czy te dane są aktualnie wykorzystywane? Czy ich przetwarzanie przynosi pozytywne efekty w ciągłym trybie?

.....

5) Jakie stanowiska/działy przedsiębiorstwa będą choćby częściowo zaangażowane w planowane wdrożenie BC?

.....

CZĘŚĆ II

Oceń aktualne i oczekiwane parametry w każdym z trzech wymiarów: technologii, procesów, danych. Oceny dokonaj w skali od 0 do 5, gdzie:

- 5 prognostyczny : najwyższy stan gotowości, jaki przedsiębiorstwo może osiągnąć w zakresie opisanego parametru, zarządzanie procesami w ramach tego parametru jest bezobsługowe, zautomatyzowane oraz bez zwłoki i ingerencji człowieka udoskonalane w trybie bieżącym w oparciu o prognozowane scenariusze zdarzeń.
- 4 zintegrowany : na tym poziomie gotowości nowy pracownik z łatwością rozumie i stosuje procesy opisanego parametru; procesy i narzędzia do ich realizacji są spójne oraz interoperacyjne w skali całego przedsiębiorstwa, a ich wyniki są zazwyczaj korzystne dla przedsiębiorstwa i mierzone w sposób, umożliwiający porównanie ich rok do roku oraz identyfikację miejsc do poprawy;
- 3 stabilny: aktywność przedsiębiorstwa w zakresie opisanego parametru daje zazwyczaj korzystne dla przedsiębiorstwa efekty, jednak istnieje dużo przestrzeni do poprawy wydajności i skuteczności działań w tym zakresie; procesy są nazwane i opisane oraz istnieją w przedsiębiorstwie pojedyncze narzędzia do obsługi niektórych procesów; narzędzia i procesy są przedmiotem ciągłego świadomego doskonalenia;
- 2 reagujący: aktywność przedsiębiorstwa w zakresie opisanego parametru jest doraźna, w odpowiedzi na pojawiające się problemy; wyniki procesów są szczątkowe, czasami pozytywne dla przedsiębiorstwa; procesy istnieją w głowach pracowników i nie są dobrze opisane ani zorganizowane w skali przedsiębiorstwa; w przedsiębiorstwie stale lub doraźnie

są wykorzystywane narzędzia cyfrowe, ale przedsiębiorstwo nie wpływa na ich sposób działania, modyfikacje ani integrację;

1 chaotyczny : aktywność przedsiębiorstwa w zakresie opisanego parametru pojawia się przypadkowo i sporadycznie przynosi korzystne efekty, brak opisu procesów i narzędzi nad procesami oraz narzędziami cyfrowymi, a ich skuteczność i wydajność jest trudna do oceny z perspektywy strategicznych celów przedsiębiorstwa;

0 nieobecny : całkowity brak aktywności w moim przedsiębiorstwie w tym zakresie.

W każdym z parametrów wskaż aktualny i oczekiwany poziom gotowości:

a) poziom aktualny zaznacz literą 'X',

b) poziom oczekiwany zaznacz literą 'Y'.

W wybranym oknie oceny parametru możesz wpisać XY, jeśli uważasz, że aktualny poziom gotowości jest wystarczający i nie wymaga poprawy.

W przypadku wątpliwości do czego odnieść oceniany parametr, np. do którego z produktów lub do którego z działów przedsiębiorstwa, oceń ten, którego w największym stopniu dotyczyć będzie planowane wdrożenie bliźniaka cyfrowego.

Parametr	Opis parametru	Poziom gotowości					
		0	1	2	3	4	5
Parametry wymiaru A	Gotowość technologii w przedsiębiorstwie						
PA1	Użyteczność i intuicyjność: działanie technologii jest zrozumiałe, użyteczne i intuicyjne dla wszystkich grup użytkowników; regularnie prowadzone są testy w tym zakresie w przedsiębiorstwie oraz wśród partnerów i klientów.						
PA2	Wierność odzwierciedlenia: jak intensywne i regularne są prace przedsiębiorstwa nad podnoszeniem poziomu dokładności i trafności wirtualnego odzwierciedlenia rzeczywistych obiektów i/lub procesów przez technologie.						
PA3	Zewnętrzne narzędzia i dane: jakim poziomem zdolności do korzystania z zewnętrznych narzędzi oraz zasobów cyfrowych (np. danych technicznych, czy finansowych) dysponuje przedsiębiorstwo dzięki technologiom.						
PA4	Autoanaliza: zdolność technologii do rozpoznawania wzorców oraz wczesnego identyfikowania błędów, anomalii, odchyłeń od domyślnych procedur oraz rekomendowania i automatycznego wdrażania usprawnień.						
PA5	Angażowanie partnerów/klientów: w jakim stopniu technologie przedsiębiorstwa są wykorzystywane przez partnerów biznesowych i/lub w jakim stopniu przedsiębiorstwo pozyskuje/korzysta z danych cyfrowych pochodzących od partnerów/klientów.						
PA6	Integralność: wszystkie komponenty technologii są sprawne, wykorzystywane i w pełni zintegrowane między sobą, jak i ze stale poszerzanym zakresem źródeł danych w przedsiębiorstwie i poza nim, pracują w oparciu o ujednocnione standardy.						

PA7	Adaptacyjność: technologie w przedsiębiorstwie rozwiązują nowe zadania zgodnie z przeznaczeniem i funkcjami technologii, również w przypadku konfrontacji z nowym problemem, wątkiem lub kontekstem.						
Parametry wymiaru B	Dojrzałość zarządzania danymi	0	1	2	3	4	5
PB1	Pozyskiwanie i zarządzanie: zdolność pozyskiwania i/lub generowania niezawodnych, aktualnych i użytecznych danych cyfrowych.						
PB2	Analizowanie rynku i trendy: zdolność obserwowania trendów zmian potrzeb i oczekiwań kluczowych grup klientów przedsiębiorstwa oraz reagowania na te zmiany w oparciu o dane dotyczące konkurencji oraz opinii klientów i partnerów przedsiębiorstwa w odniesieniu do produktów/usług.						
PB3	Obsługa nowych zastosowań i skuteczność: zdolność i skuteczność działu IT przedsiębiorstwa w mobilizowaniu danych cyfrowych dla nowego specyficznego celu dowolnego zespołu, użytkownika lub potrzeby biznesowej, np. w celu opracowania nowej wersji produktu, weryfikacji opłacalności usługi, modyfikacji stanowiska pracy, itd.						
PB4	Podejmowanie decyzji i wiarygodność: zdolność szybkiego i elastycznego opisywania, segregowania i redukowania danych oraz do podejmowania decyzji w oparciu o wiarygodne dane.						
PB5	Zabezpieczanie i etyka: zdolność zabezpieczania i etycznego wykorzystywania danych cyfrowych, w tym danych o klientach i ich preferencjach w celu zwiększania wartości dodanej produktów/usług.						
PB6	Rozwój innowacji i eksperymenty: zdolność przedsiębiorstwa do rozwoju innowacji poprzez prowadzenie eksperymentów przy użyciu narzędzi i danych cyfrowych.						
PB7	Włączenie cyfrowe i kultura organizacji: na ile zrozumiała i powszechna wśród pracowników i partnerów przedsiębiorstwa jest wiedza o danych cyfrowych, sposobie ich wykorzystywania oraz wpływie na rozwój przedsiębiorstwa i pracowników.						
Parametr	Opis parametru	Poziom gotowości					
Parametry wymiaru C	Dane cyfrowe	0	1	2	3	4	5
PC1	Kompletność i spójność: w jakim stopniu opisy danych są spójne oraz zawierają wszystkie przydatne w planowanym wdrożeniu tagi i atrybuty.						
PC2	Interoperacyjność: w jakim stopniu formaty i semantyka danych są interoperacyjne z popularnymi w						

	przedsiębiorstwie i/lub wśród partnerów/klientów systemami i standardami.						
PC3	Gęstość / intensywność: w jakim stopniu ilość danych, generowanych na jednostkę czasu, przestrzeni, mocy zaspokaja potrzeby planowanego wdrożenia i/lub wykracza ponad ilości powszechne w podobnych zastosowaniach.						
PC4	Dostępność / wykrywalność: w jakim stopniu dane są dostępne, a opisy bądź atrybuty danych umożliwiają ich zwinne wyszukiwanie.						
PC5	Aktualność / częstotliwość: w jakim stopniu działania przedsiębiorstwa zapewniają dostęp do danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego.						
PC6	Wiarygodność danych: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia, że wszystkie dane są opisane w sposób wiarygodny i poprawny.						
PC7	Prywatność: w jakim stopniu przedsiębiorstwo zapewnia neutralność danych pod względem zabezpieczenia prywatności i ochrony danych osobowych, np. poprzez anonimizację, bądź pseudonimizację.						

Załącznik 02. Formularz eksperckiej oceny gotowości cyfrowej przedsiębiorstwa

FORMULARZ EKSPERCKIEJ OCENY GOTOWOŚCI CYFROWEJ							
Par am etr	Obszary gotowości cyfrowej	Poziom gotowości cyfrowej przedsiębiorstwa					
		X (aktualny)		Y (docelowy)			
		0	1	2	3	4	5
PG C1	Produkty/dane: pozyskiwanie i generowanie danych, cyfrowa personalizacja, kustomizacja, analizy rynku, scenariusze wdrożeń, finanse DZIAŁY: projektanci, konstruktorzy, finansowy, sprzedaż/analizy rynku						
PG C2	Platforma sprzedażowa / Narzędzia IT: analizowanie rynku, trendów i konkurencji; spójność i zwinność działań IT; architektura i standardy; zwinność wyboru dostawców IT i technologii; DZIAŁY: IT, jakość, zamówienia						
PG C3	Ludzie/zwinność: zdolność do wprowadzania zmian; kompetencje cyfrowe; doświadczenie klienta/UX; wydajność zespołów; współpraca zdalna; nastawienie do zmian i zwinność ich wdrażania. DZIAŁY: R&D, wszystkie						
PG C4	Ekosystem/współpraca: wiedza o klientach i partnerach oraz ich zaangażowanie; decyzje o współdzieleniu danych z partnerami; wiarygodność marki; zarządzanie relacjami, wpływami i lojalnością; zaufanie do marki i jej wartość; DZIAŁY: marketing, sprzedaż, R&D,						
PG C5	Wydajność operacyjna/bezpieczeństwo: zarządzanie zasobami; optymalizacja produkcji; sieć dostawców i łańcuchy dostaw; finanse i rozliczenia; cyberbezpieczeństwo i etyka; automatyzacja i optymalizacja procesów; DZIAŁY: produkcja, logistyka, księgowość, zamówienia,						

PG C6	Zarządzanie strategiczne/innowacyjność: decyzje inwestycyjne; model biznesowy; planowanie zmian; analizy rynku; innowacje; zarządzanie ryzykiem; DZIAŁY: zarząd; jakość						
PG C7	Kultura organizacji: włączenie cyfrowe, poczucie sprawczości, świadomość wpływu technologii na przedsiębiorstwo, pracowników i otoczenie DZIAŁY: wszystkie						