

**Maciej Bielecki**



## **Design for eXcellence 4.0**

Projektowanie wspomagające  
doskonałość



**Design for eXcellence 4.0**



WYDAWNICTWO  
UNIWERSYTETU  
ŁÓDZKIEGO

**Maciej Bielecki**

## **Design for eXcellence 4.0**

Projektowanie wspomagające  
doskonałość

Maciej Bielecki (ORCID: 0000-0001-6550-3512) – Uniwersytet Łódzki  
Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny, Katedra Logistyki i Innowacji  
90-214 Łódź, ul. Rewolucji 1905 r. nr 37/39

RECENZENCI

*Maciej Kuboń, Zbigniew Wiśniewski*

REDAKTOR INICJUJĄCY

*Katarzyna Włodarczyk*

REDAKCJA

*Magdalena Czarnecka*

SKŁAD I ŁAMANIE

*AGENT PR*

KOREKTA TECHNICZNA

*Katarzyna Woźniak*

PROJEKT OKŁADKI

*Polkadot Studio Graficzne*

*Aleksandra Woźniak, Hanna Niemierowicz*

Zdjęcie na okładce: © Depositphotos.com/sumkinn

© Copyright by Maciej Bielecki, Łódź 2024

© Copyright for this edition by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2024

Publikacja jest udostępniona na licencji Creative Commons

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

<https://doi.org/10.18778/8331-551-5>

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego

Wydanie I. W.11441.24.0.M

Ark. wyd. 16; ark. druk. 15,375

ISBN 978-83-8331-551-5

e-ISBN 978-83-8331-552-2

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego

90-237 Łódź, ul. Matejki 34A

[www.wydawnictwo.uni.lodz.pl](http://www.wydawnictwo.uni.lodz.pl)

e-mail: [ksiegarnia@uni.lodz.pl](mailto:ksiegarnia@uni.lodz.pl)

tel. 42 635 55 77

# Spis treści

Akronimy wykorzystane w pracy	7
Wstęp	17
Rozdział 1	
<b>Projektowanie i rozwój produktów wspomagające doskonałość</b>	<b>21</b>
1.1. Wybrane zagadnienia z obszaru projektowania i rozwoju produktów	22
1.2. Pojęcie i istota projektowania wspomagającego doskonałość	47
Rozdział 2	
<b>Projektowanie i rozwój produktów w aspekcie środowiskowym i technologicznym</b>	<b>69</b>
2.1. Metoda badań literaturowych	70
2.2. Wyniki badań bibliometrycznych	75
2.3. Analiza wyników badań literaturowych aspektów środowiskowych w PD	84
2.4. Analiza wyników badań literaturowych aspektów technologicznych w PD	90
Rozdział 3	
<b>Projektowanie i rozwój produktów w ramach obszaru środowiskowego</b>	<b>97</b>
3.1. Projektowanie i rozwój produktu w ramach zrównoważonego rozwoju	98
3.2. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym	110
3.3. Zielone projektowanie i rozwój produktu	125
Rozdział 4	
<b>Projektowanie i rozwój produktu w ramach obszaru technologicznego</b>	<b>135</b>
4.1. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście technologii I 4.0	135
4.2. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście wirtualnej rzeczywistości	149
4.3. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście Internetu Rzeczy	162
4.4. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście sztucznej inteligencji	172
Rozdział 5	
<b>Projektowanie wspomagające doskonałość 4.0</b>	<b>191</b>
5.1. Logistyka odwrótne oraz łańcuchy dostaw o obiegu zamkniętym jako kluczowy element projektowania wspomagającego doskonałość 4.0	192
5.2. Koncepcja projektowania wspomagającego doskonałość 4.0	203
5.3. Wyzwania stojące przed koncepcją projektowania wspomagającego doskonałość 4.0 oraz potencjalne luki badawcze	213
Podsumowanie	221
Bibliografia	227
Spis rysunków	243
Spis tabel	245



# Akronimy wykorzystane w pracy

3DP	– <i>3D Printing</i> – Druk 3D
3DS	– <i>3D Object Scanners</i> – Skanery obiektów w 3D
3P	– <i>People, Planet, Profit</i> – Ludzie, planeta, profity
3S	– <i>Sustainable, Socially Satisfying, Successful for Organization</i> – Paradygmat zrównoważony, społecznie satysfakcjonujący, przynoszący sukces organizacji
5G	– <i>5G Technologies</i> – Technologia komunikacji 5G
10R	– <i>Recover, Recycle, Repurpose, Remanufacture, Refurbish, Repair, Reuse, Reduce, Rethink, Refuse</i> – Odzyskać, poddawać recyklingowi, zmienić przeznaczenie, regenerować, odnawiać, naprawiać, ponownie użyć, redukować, ponownie przemyśleć, odrzucić
AI	– <i>Artificial Intelligence</i> – Sztuczna inteligencja
AM	– <i>Additive Manufacturing</i> – Wytwarzanie addytywne
ANPD	– <i>Agile New Product Development</i> – Zwinny rozwój nowego produktu
AR	– <i>Augmented Reality</i> – Rozszerzona rzeczywistość
ASID	– <i>The American Society of Industrial Design</i> – Amerykańskie Stowarzyszenie Wzornictwa Przemysłowego
AV	– <i>Autonomic Vehicle</i> – Autonomiczne pojazdy
AW	– <i>Across-the-Wall</i> – Metoda szeregowej realizacji zadań
AX	– <i>Axiomatic Design</i> – Projektowanie aksjomatyczne
BANI	– <i>Brittle, Anxious, Non-linear, Incomprehensible</i> – Świat kruchy, niespokojny, nieliniowy i niezrozumiały
BD	– <i>Big Data</i> – Zbiory danych
BDA	– <i>Big Data Analytics</i> – Analityka dużych zbiorów danych
BI	– <i>Business Intelligence</i> – Analityka biznesowa
BLC	– <i>Blockchain</i> – Technologia zabezpieczająca systemy informatyczne
BioBLS	– <i>Bio-based loop strategies</i> – Jedna ze strategii DfBC bazująca na biologicznym obiegu zamkniętym
BioILS	– <i>Bio-inspired loop strategies</i> – Jedna ze strategii DfBC inspirowana biologicznym obiegiem zamkniętym
BioTRIZ	– <i>Bionic Theory of Inventive Problem Solving</i> – Teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań bazująca na bionice



BoL	– <i>Beginning-of-Life</i> – Początkowa faza cyklu życia systemów produkcyjnych
BoM	– <i>Bill of Materials</i> – Zestawienie materiałowe produktu
CA	– <i>Cryptographic Anchors</i> – Kotwice kryptograficzne
CAD	– <i>Computer Aided Design</i> – Komputerowe wspomaganie projektowania
CAE	– <i>Computer Aided Engineering</i> – Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich
CAF	– <i>Computer Aided Facility Management</i> – Komputerowe wspomaganie zarządzania obiektami
CAM	– <i>Computer Aided Manufacturing</i> – Komputerowe wspomaganie wytwarzania
CAS	– <i>Component Acquisition Site</i> – Miejsca pozyskania komponentów
CAT	– <i>Computer Aided Testing</i> – Komputerowe wspomaganie testowania
CAVE	– <i>Cave Automatic Virtual Environment</i> – Jaskinia wirtualnego środowiska, wspólnie połączone wieloe ekranowe projektory
CAX	– <i>Computer Aided</i> – Komputerowe wspomaganie wybranego obszaru operacyjnego organizacji
CC	– <i>Cloud Computing</i> – Chmura obliczeniowa
CDE	– <i>Common Data Environments</i> – Repozytorium gromadzenia wiedzy
CE	– <i>Concurrent Engineering</i> – Inżynieria współbieżna
CEcon	– <i>Circular Economy</i> – Gospodarka o obiegu zamkniętym, gospodarka cyrkularna
CF	– <i>Carbon Footprint</i> – Ślad węglowy
Chat GPT	– <i>Chat Generative Pretrained Transformer</i> – Narzędzie wykorzystujące sztuczną inteligencję opartą na modelu GPT
CIM	– <i>Computer Integrated Manufacturing</i> – Komputerowa integracja produkcji
CIX	– <i>Computer Integrated</i> – Komputerowa integracja systemów – CAX
CLS	– <i>Close the Loop Strategies</i> – Strategia zamykania obiegu
CM	– <i>Cloud Manufacturing</i> – Wytwarzanie w chmurze
CPD	– <i>Circular Product Design</i> – Cykularne projektowanie produktów
CPDP	– <i>Collaborative Product Design Platform</i> – Platformy współpracy nad projektowaniem produktu
CPS	– <i>Cyber-Physical System</i> – System cyberfizyczny
CSA	– <i>Cuckoos Search Algorithm</i> – Algorytm bazujący na zachowaniach lęgowych kukulek
CSR	– <i>Corporate Social Responsibility</i> – Społeczna odpowiedzialność biznesu
CtG	– <i>Cradle to The Grave</i> – Całościowy sposób patrzenia na projektowanie produktu od kołyski aż po zakończenie cyklu jego życia
Df10R	– <i>Design for 10R</i> – Projektowanie wspomagające działania gospodarki cyrkularnej
DfA	– <i>Design for Assembly</i> – Projektowanie wspomagające montaż

DfA&DDM	– <i>Design for Autonomy and Decentralized Decision Making</i> – Projektowanie wspomagające autonomię i decentralizację decyzji
DfAc	– <i>Design for Accessibility</i> – Projektowanie wspomagające dostępność
DfA <sub>D</sub>	– <i>Design for Adaptability</i> – Projektowanie wspomagające adaptowalność
DfAM	– <i>Design for Additive Manufacturing</i> – Projektowanie wspomagające wytwarzanie addytywne
DfA <sub>TM</sub>	– <i>Design for Automation</i> – Projektowanie wspomagające automatyzację
DfBC	– <i>Design for a Biological Cycle</i> – Projektowanie wspomagające cykl biologiczny
DfC	– <i>Design for Cost</i> – Projektowanie wspomagające minimalizację kosztów
DfCC	– <i>Design for Co-Creation</i> – Projektowanie wspomagające współtworzenie
DfCD	– <i>Design for Co-design of Value with Third Party</i> – Projektowanie wspomagające współprojektowanie ze stroną trzecią
DfCE	– <i>Design for Circular Economy</i> – Projektowanie wspomagające gospodarkę o obiegu zamkniętym
DfCenb	– <i>Design for Cloud-Enabled</i> – Projektowanie wspomagające wykorzystanie chmury
DfCh	– <i>Design for Changeability</i> – Projektowanie wspomagające możliwość zmiany
DfCR	– <i>Design for Changing requirements</i> – Projektowanie wspomagające zmienne potrzeby
DfCRR	– <i>Design for Chronic Risk Reduction</i> – Projektowanie redukujące przewlekłe ryzyko
DfCS	– <i>Design for Cyber Security</i> – Projektowanie wspomagające cyberbezpieczeństwo
DfD	– <i>Design for Disassembly</i> – Projektowanie wspomagające demontaż
DfDA	– <i>Design for Data Analytics</i> – Projektowanie wspomagające analizę danych odczytanych z produktu
DfDDO	– <i>Design for Data Driven Operation</i> – Projektowanie wspomagające operacje oparte na danych
DfDDS	– <i>Design for Data Driven Services</i> – Projektowanie wspomagające usługi oparte na danych
DfD <sub>LV</sub>	– <i>Design for Delivery</i> – Projektowanie wspomagające dostawę
DfD <sub>sp</sub>	– <i>Design for Disposability</i> – Projektowanie wspomagające możliwość utylizacji
DfE	– <i>Design for Environment</i> – Projektowanie wspomagające środowisko
DfEC	– <i>Design for Energy Conservation</i> – Projektowanie minimalizujące zużycie energii
DfEE	– <i>Design for Energy Efficiency</i> – Projektowanie wspomagające efektywność energetyczną

- DfEoL – *Design for End of Life* – Projektowanie wspomagające koniec cyklu życia produktu
- DfEU – *Design for Empowered Users/Customers* – Projektowanie wspomagające pozycję klienta w swoim działaniu
- DfF – *Design for Flexibility* – Projektowanie wspomagające elastyczność
- DfF<sub>R</sub> – *Design for Fatigue Resistance* – Projektowanie wspomagające odporność na złamania zmęczeniowe materiału
- DfI&S – *Design for Information and Software Related Components* – Projektowanie wspomagające komponenty związane z informacją oraz oprogramowaniem
- DfI4.0 – *Design for Industry 4.0* – Projektowanie wspomagające przemysł 4.0
- DfII – *Design for Inline Inspection of Manufactured Parts* – Projektowanie wspomagające kontrolę w czasie rzeczywistym produkowanych części
- DfIntg – *Design for Vertical, Horizontal and Circular Integration* – Projektowanie wspomagające pionową, poziomą oraz cyrkularną integrację
- DfL – *Design for Lifecycle* – Projektowanie wspomagające cykl życia produktu
- DfL – *Design for Logistics* – Projektowanie wspomagające logistykę
- DfL<sub>C</sub> – *Design for Low Carbon – Product Low Carbon Design* – Projektowanie wspomagające zmniejszanie śladu węglowego w produktach
- DfM – *Design for Manufacturing* – Projektowanie wspomagające wytwarzanie i montaż
- DfM/OF – *Design for Material/Operation Flow* – Projektowanie wspomagające przepływ materiałów oraz operacji
- DfM<sub>A</sub> – *Design for Manufacturing and Assembly* – Projektowanie wspomagające wytwarzanie i montaż
- DfM<sub>AIN</sub> – *Design for Maintainability* – Projektowanie wspomagające konserwację i naprawy produktów
- DfMC – *Design for Material Conservation* – Projektowanie wspomagające minimalizację zużycia materiałów
- DfM<sub>M</sub> – *Design for Modularity* – Projektowanie wspomagające (pod kątem) modułowość
- DfM<sub>MT</sub> – *Design for Minimum Manufacturing Time* – Projektowanie wspomagające minimalny czas wytwarzania
- DfM<sub>W</sub> – *Design for Minimal Weight* – Projektowanie wspomagające minimalizację wagi produktu
- DfN – *Design for Network* – Projektowanie wspomagające sieciowość
- DfO – *Design for Obsolescence* – Projektowanie wspomagające żywotność produktów
- DfPDM – *Design for Product Data Management* – Projektowanie wspomagające zarządzanie danymi produktu
- DfQ – *Design for Quality* – Projektowanie wspomagające jakość
- DfR – *Design for Reliability* – Projektowanie wspomagające niezawodność

DfR <sub>C</sub>	– <i>Design for Recycling (Recyclability)</i> – Projektowanie wspomagające recykling
DfR <sub>em</sub>	– <i>Design for Remanufacture</i> – Projektowanie wspomagające regenerację
DfRL	– <i>Design for Reverse Logistics</i> – Projektowanie wspomagające logistykę odwrotną
DfR <sub>sc</sub>	– <i>Design for Resources</i> – Projektowanie wspomagające ochronę i optymalne wykorzystanie zasobów
DfR <sub>u</sub>	– <i>Design for Reuse</i> – Projektowanie wspomagające ponowne użycie
DfS	– <i>Design for Sustainability</i> – Projektowanie wspomagające zrównoważony rozwój
DfS5.0	– <i>Design for Society 5.0</i> – Projektowanie wspomagające społeczności 5.0
DfS <sub>C</sub>	– <i>Design for Supply Chain</i> – Projektowanie wspomagające łańcuchy dostaw
DfS <sub>COM</sub>	– <i>Design for Secondary Components</i> – Projektowanie wspomagające wykorzystanie komponentów wtórnych
DfS <sub>R</sub>	– <i>Design for Social Responsibility</i> – Projektowanie wspomagające społeczną odpowiedzialność
DfSS	– <i>Design for Safety &amp; Security</i> – Projektowanie wspomagające bezpieczeństwo
DfS <sub>VC</sub>	– <i>Design for Services</i> – Projektowanie wspomagające usługi
DfT	– <i>Design for Testability</i> – Projektowanie wspomagające testowalność
DfTC	– <i>Design for a Technical Cycle</i> – Projektowanie wspomagające cykl techniczny
DfW <sub>M&amp;R</sub>	– <i>Design for Waste Minimalization and Recovery</i> – Projektowanie wspomagające minimalizację odpadów i odzysk
DfX	– <i>Design for eXcellence</i> – Projektowanie wspomagające doskonałość
DinC	– <i>Design in Constrains</i> – Projektowanie w warunkach ograniczeń
DIY	– <i>Do It Yourself</i> – Działania lub produkty typu „Zrób to sam”
DL	– <i>Deep Learning</i> – Głębokie nauczanie
DM	– <i>Data Mining</i> – Eksploracja danych
DP	– <i>Digital Product Code</i> – Cyfrowy projekt produktu
DRC	– <i>Design Rule Check</i> – Weryfikacja projektu pod kątem zasad określonych przez klienta
DT	– <i>Design Thinking</i> – Sposób projektowania oparty na myśleniu projektowym
DT <sub>w</sub>	– <i>Digital Twins</i> – Bliźniaki cyfrowe
ECD	– <i>Environmentally Conscious Design</i> – Ekologicznie świadome projektowanie
ECD&M	– <i>Environmentally Conscious Design and Manufacturing</i> – Projektowanie i produkcja ekologicznie świadoma
ECO	– <i>Engineering Change of Order</i> – Inżynierskie wykonanie zmian w projektowanym wyrobie
ED	– <i>Eco-design</i> – Projektowanie uwzględniające aspekty środowiskowe
EI	– <i>Engineering Intelligence</i> – Analityka inżynierska
EoL	– <i>End-of-Life</i> – Końcowa faza cyklu życia systemów produktowych
EPC	– <i>Electronic Product Code</i> – Elektroniczne kody produktów

E-PLC	– <i>Engineering Product Life Cycle</i> – Inżynieria cyklu życia produktu
ERP	– <i>Enterprise Resources Planning</i> – Planowanie zasobów przedsiębiorstwa
ES	– <i>Expert System</i> – Systemy eksperckie
EU	– <i>European Union</i> – Unia Europejska
FEM	– <i>Finite Element Method</i> – Metoda elementów skończonych
FTCP	– <i>Flexible Technical Computing Platform</i> – Techniczna, elastyczna platforma komputerowa
GC	– <i>Green Creativity</i> – Zielona kreatywność
GD	– <i>Green Design</i> – Zielone projektowanie produktu
GEng	– <i>Green Engineering</i> – Zielona inżynieria
Gi-Go	– <i>Garbage In – Garbage Out</i> – Zasada „śmieci” wrzucone do procesu lub systemu dadzą „śmieci” na jego wyjściu
GIY	– <i>Grow It yourself</i> – Produkty typu „wyhoduj je sobie w domu sam”
GLPD	– <i>Green Life Product Design Method</i> – Metoda projektowania zielonego życia produktu
GPD	– <i>Green Product Development</i> – Zielone projektowanie i rozwój produktu
GPS	– <i>Global Positioning System</i> – Globalny system pozycjonowania
GSCM	– <i>Green Supply Chain Management</i> – Zielone zarządzanie łańcuchem dostaw
Hi-Fi	– <i>High Fidelity</i> – Wysoka wierność odtworzenia, np. dźwięku
HMD	– <i>Head-mounted Displays</i> – Wyświetlacze montowane na głowie – gogle VR
HP	– <i>Hybrid Prototyping</i> – Prototypowanie hybrydowe
I4.0	– <i>Industry 4.0</i> – Przemysł 4.0 – Czwarta rewolucja przemysłowa
ICT	– <i>Information and Communication Technology</i> – Technologie informatyczne i komunikacyjne
ID	– <i>Industrial Design</i> – Wzornictwo przemysłowe
IDA	– <i>Institute for Defense Analysis</i> – Instytut analiz obronności USA
IDEA	– <i>The Industrial Design Education Association</i> – Stowarzyszenia Edukacji Wzornictwa Przemysłowego USA
IDI	– <i>The Industrial Design Institute</i> – Instytut Wzornictwa Przemysłowego USA
IDSA	– <i>The Industrial Designer Society of America</i> – Stowarzyszenie Projektantów Przemysłowych Ameryki
IIoT	– <i>Industrial Internet of Things</i> – Przemysłowy Internet Rzeczy
ImmCT	– <i>Immersive Computing Technology</i> – Immersyjna technologia komputerowa
IoE	– <i>Internet of Everything</i> – Internet Wszystkiego
IoM	– <i>Internet of Materials</i> – Internet Materiałów
IoMT	– <i>Internet of Medical Things</i> – Internet Urządzeń Medycznych
IoS	– <i>Internet of Services</i> – Internet Usług
IoT	– <i>Internet of Things</i> – Internet Rzeczy
IoT-GSI	– <i>The Global Standards Initiative on Internet of Things</i> – Międzynarodowa organizacja standaryzacji IoT
IPD	– <i>Integrated Product Development</i> – Zintegrowany rozwój produktu

IT	– <i>Information Technology</i> – Technologie informatyczne
KBE	– <i>Knowledge Based Engineering</i> – Inżynieria wspomagana wiedzą
KBE	– <i>Knowledge Based Systems</i> – Systemy bazujące na wiedzy
KM	– <i>Knowledge Management</i> – Zarządzanie wiedzą
KMS	– <i>Knowledge Management Systems</i> – Systemy zarządzania wiedzą
KS	– <i>Knowledge Sharing</i> – Procesy dzielenia się wiedzą
LCA	– <i>Life Cycle Assessment</i> – Ocena cyklu życia produktu
LCC	– <i>Life Cycle Costing</i> – Rachunek kosztów cyklu życia produktu
LCE	– <i>Life Cycle Engineering</i> – Inżynieria cyklu życia produktu
LE	– <i>Linear Economy</i> – Gospodarka liniowa
LM	– <i>Lean Management</i> – Szczupłe zarządzanie
LMf	– <i>Lean Manufacturing</i> – Szczupłe wytwarzanie
M2M	– <i>Machine-to-Machine</i> – Komunikacja pomiędzy maszynami
MA	– <i>Mobile Application</i> – Aplikacje mobilne
MC	– <i>Mass Customization</i> – Masowa kastomizacja
MES	– <i>Manufacturing Execution System</i> – System realizacji produkcji
ML	– <i>Machine Learning</i> – Uczenie maszynowe
Mol	– <i>Middle-of-Life</i> – Środkowa faza cyklu życia systemów produktowych
M-PLC	– <i>Marketing Product Life Cycle</i> – Marketingowy cykl życia produktu
MRO	– <i>Maintenance, Repair, Operation</i> – Usystematyzowane działania konserwacyjne, naprawcze i operacyjne
MRP	– <i>Material Requirements Planning</i> – Planowanie potrzeb materiałowych
MRP II	– <i>Manufacturing Resource Planning</i> – Planowanie zdolności wytwórczych
MV	– <i>Machine Vision</i> – Systemy wizyjne
NFC	– <i>Near Field Communication</i> – Komunikacja zbliżeniowa
NLP	– <i>Natural Language Processing</i> – Przetwarzanie języka naturalnego
NPD	– <i>New Product Development</i> – Rozwój nowego produktu
OEM	– <i>Original Equipment Manufacturer</i> – Producent oryginalnych komponentów
OTS	– <i>Optical Tracking Systems</i> – Optyczne systemy śledzenia
PCB	– <i>Printed Circuit Board</i> – Płytki obwodu drukowanego
PD	– <i>Product Design &amp; Development</i> – Projektowanie i rozwój produktów
PD 4.0	– <i>Product Design &amp; Development 4.0</i> – Projektowanie i rozwój produktów oparte na technologiach Industry 4.0 oraz szeroko rozumianym zrównoważonym rozwojem
PDM	– <i>Product Data Management</i> – Zarządzanie danymi produktu
PDs	– <i>Product Design</i> – Projektowanie produktu
PDv	– <i>Product Development</i> – Rozwój produktu
PE	– <i>Parallel Engineering</i> – Inżynieria równoległa
PLC	– <i>Product Life Cycle</i> – Cykl życia produktu
PLM	– <i>Product Life Cycle Management</i> – Zarządzanie cyklem życia produktu



PPP	– <i>Pollution Prevention Pays</i> – Zapobieganie zanieczyszczeniom jest opłacalne
PRC	– <i>Product Restoration Center</i> – Centra przywracania produktów i komponentów
PRE	– <i>Products Reverse Engineering</i> – Inżynieria odwrotna (wsteczna) produktów
ProdSI	– <i>Product Sustainability Index</i> – Indeks zrównoważonego rozwoju produktu
PWLL	– <i>Power Wall</i> – Technologia VR bazująca na jednym dużym ekranie projektora
QFD	– <i>Quality Function Deployment</i> – Metoda projektowania polegająca na rozwinięciu funkcji jakości
QFDE	– <i>Quality Function Deployment for Environment</i> – Metoda projektowania polegająca na rozwinięciu funkcji jakości uwzględniająca aspekty środowiskowe
R&D&I	– <i>Research &amp; Development &amp; Innovation</i> – Badania, rozwój i innowacje
R&RC	– <i>Recycling &amp; Recovery Centers</i> – Centra recyklingu i odzysku
RAMI4.0	– <i>Reference Architecture Model 4.0</i> – Model architektury referencyjnej produktu 4.0
RE	– <i>Reverse Engineering</i> – Model biznesowy inżynierii odwrotnej
REACH	– <i>Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals</i> – Rozporządzenie UE dotyczące rejestracji, oceny, wydawania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów
RFID	– <i>Radio Frequency Identification</i> – Komunikacja wykorzystująca technologię radiową
RM	– <i>Reverse Manuals</i> – Odwrócona instrukcja obsługi
RP	– <i>Rapid Prototyping</i> – Szybkie prototypowanie
RRR	– <i>Reduce, Reuse, Recycle</i> – Redukuj, ponownie używaj, poddawaj recyklingowi
S 5.0	– <i>Society 5.0</i> – Społeczeństwo 5.0
SAAC	– <i>Sense-Analyze-Act Cycle</i> – Cykl poczuj, przeanalizuj, działaj wykorzystywany w Internecie Rzeczy
SB	– <i>Synthetic Biology</i> – Biologia syntetyczna
SBM	– <i>Service-Based Models</i> – Modele bazujące na usługach
SCM	– <i>Supply Chain Management</i> – Zarządzanie łańcuchem dostaw
S <sub>COM</sub>	– <i>Secondary Components</i> – Komponenty wtórne
Scp	– <i>Scopus</i> – Baza bibliometryczno-abstraktowa Scopus
SCT	– <i>Simulation and Cognitive Technologies</i> – Symulacje i technologie kognitywne
SD	– <i>Sustainable design</i> – Zrównoważone projektowanie
SE	– <i>Simultaneous Engineering</i> – Inżynieria symultaniczna
SF	– <i>Smart Factory</i> – Inteligentna fabryka
SH	– <i>Smart Healthcare</i> – Inteligentna służba zdrowia

SI	– <i>Smart Industry</i> – Inteligentny przemysł
S-LCA	– <i>Social Life Cycle Assessment</i> – Społeczna ocena cyklu życia produktu
SLCD	– <i>Sustainable Life-Cycle Design</i> – Projektowanie zrównoważonego cyklu życia produktu
SLS	– <i>Slow the Loop Strategies</i> – Strategia spowalniania obiegu
SM	– <i>Smart Manufacturing</i> – Inteligentne wytwarzanie
SMS	– <i>Smart Manufacturing Systems</i> – Inteligentne systemy wytwarzania
SN	– <i>Sensors Networks</i> – Sieci czujników
SOE	– <i>Set of Experience</i> – Zestaw doświadczeń
SOEKS	– <i>Set of Experience Knowledge Structure</i> – Ustrukturalizowany zestaw doświadczeń wiedzy
SP	– <i>Smart Product</i> – Inteligentny produkt
SPD	– <i>Smart Product Development</i> – Rozwój inteligentnych produktów
SPD	– <i>Sustainable Product Development</i> – Zrównoważony rozwój produktu
SPD-FEAP	– <i>Smart Product Design-Finite Element Analysis Process</i> – Inteligentne projektowanie produktu metodą elementów skończonych
SqE	– <i>Sequence Engineering</i> – Inżynieria sekwencyjna
SQFD	– <i>Smart Quality Function Deployment</i> – Metoda rozwinięcia funkcji jakości wykorzystująca dane internetowe
SrE	– <i>Serial Engineering</i> – Inżynieria seryjna
STAR	– <i>State of The Art</i> – Metoda przeglądu literatury State of The Art
SVPD	– <i>Smart Virtual Product Development</i> – Inteligentny wirtualny rozwój produktu
TBL	– <i>The Triple Button Line</i> – Potrójny wynik końcowy
TE	– <i>Team Engineering</i> – Inżynieria zespołowa
TOC	– <i>Theory of Constrains</i> – Teoria ograniczeń
TQM	– <i>Total Quality Management</i> – Kompleksowe zarządzanie jakością
TRIZ	– <i>Теория Решения Изобретательских Задач</i> – <i>Theory of Inventive Problem Solving</i> – Teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań
TTR	– <i>Time to Repair</i> – Czas naprawy (przywrócenia)
UP	– <i>Used Product</i> – Produkty używane lub zużyte
V2I	– <i>Vehicle to Infrastructure</i> – Komunikacja pomiędzy pojazdami a ich infrastrukturą
V2V	– <i>Vehicle-to-Vehicle</i> – Komunikacja pomiędzy pojazdami
VA	– <i>Virtual Assembly</i> – Wirtualny montaż
VCM	– <i>Virtual Clay Modeling</i> – Metoda wirtualnego modelowania przypominająca pracę z materiałem plastycznym, np. gliną
VD	– <i>Virtual Design</i> – Wirtualne projektowanie
VE	– <i>Virtual Environment</i> – Środowisko wirtualne
VM	– <i>Virtual Manufacturing</i> – Wirtualne wytwarzanie
VMd	– <i>Virtual Modeling</i> – Wirtualne modelowanie



- VoP    – *The Voice of The Product* – Głos produktu pozwalający komunikować się produktowi z jego wytwórcami
- VP     – *Virtual Prototyping* – Wirtualne prototypowanie
- VPD   – *Virtual Product Design & Development* – Wirtualny rozwój produktu
- VR    – *Virtual Reality* – Wirtualna rzeczywistość
- VS    – *Virtual Sketching* – Wirtualne szkicowanie
- VUCA – *Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity* – Świat zmienny, niepewny, złożony i niejednoznaczny
- WDvc – *Wearable Devices* – Możliwe do noszenia urządzenia z technologią IoE
- WoS   – *Web of Science* – Baza bibliometryczno-abstraktowa Web of Science
- WT    – *Waste Taxi* – Taksówki na odpady
- XAI   – *Explainable Artificial Intelligence* – Badania wyjaśniające sztuczną inteligencję

# Wstęp

Globalny świat trzeciej dekady XXI wieku staje przed coraz poważniejszymi wyzwaniami w co najmniej trzech kluczowych obszarach: środowiskowym, społecznym i technologicznym. Ich kolejność nie jest przypadkowa. Stan środowiska naturalnego na skutek aktywności ludzi i antropocentrycznego podejścia robi się coraz bardziej katastrofalny i w coraz szybszym tempie zmniejsza się dostępność naturalnych zasobów Ziemi<sup>1</sup>. Pod koniec 2022 roku na Antarktydzie pod wpływem ocieplania klimatu zginęło niemal 10 000 piskląt pingwinów, ponieważ lód, na którym stały, roztopił się i pod nimi załamał<sup>2</sup>. W sierpniu 2022 roku na Odrze, drugiej co do wielkości rzek Polski, praktycznie ustało życie fauny i flory. Setki tysięcy martwych ryb unosiły się na wodzie, tworząc katastrofę ekologiczną, z jaką Polska nie miała jeszcze do czynienia<sup>3</sup>. Przemysł coraz intensywniej zaznacza swój negatywny wpływ na środowisko naturalne, co niesie ze sobą konsekwencje. Należy się spodziewać, że w niedługim czasie klimat stanie się na tyle nieprzewidywalny, że dotychczasowe paradygmaty funkcjonowania społeczności i biznesu będą musiały ulec radykalnym zmianom.

Kwestie społeczne to przede wszystkim kryzysy zbrojne oraz humanitarne, ale także pojawiające się nowe koncepcje ekonomiczne i modele biznesowe. Ciągąca się wojna w Ukrainie, konflikt zbrojny w Syrii oraz walki w innych miejscach świata doprowadzają do masowych migracji, które wymykają się spod kontroli. Pomimo różnorodnych punktów widzenia zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku mamy do czynienia z tragedią ludzi, którzy mają swoje uczucia i marzenia, chcą normalnie żyć, a tak doskonale rozwinięta cywilizacja, jak cywilizacja europejska, nie potrafi sobie z tym poradzić. Dodatkowo, dotychczasowe modele biznesowe, bazujące na prostej kalkulacji czasu, kosztów i jakości, zaczynają tracić na znaczeniu.

- 1 H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (red.), *Integovernmental Panel of Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Great Britain 2022.
- 2 <https://klimat.rp.pl/zwierzeta/art39006251-na-antarktydzie-zginelo-niemal-10-tysiecy-pisklat-pingwinow> [dostęp: 22.09.2023].
- 3 <https://www.wwf.pl/zbrodnia-na-odrze-zbrodnia-na-nas-wszystkich> [dostęp: 22.09.2023].

Pojawiają się nowe wzory, które zaczynają różnić się od obecnego pojmowania biznesu (np. *Revenue Sharing*, *Hidden Revenue*, *Self Service* itp.<sup>4</sup>).

Ostatnie z wyzwań to dynamiczny rozwój technologii. Od momentu pojawienia się strategii przemysłu 4.0 (*Industry 4.0* – I 4.0) oraz technologii ją wspierających otwarta została przestrzeń, która umożliwia tworzenie niespotykanych dotąd rozwiązań, koncepcji, systemów i modeli biznesowych. Świat realny zmienia się w wolnym tempie w świat wirtualny, dokonując także zmian w nawykach konsumentów. Ci żyjący w strefie bezpieczeństwa i względnego komfortu używają produktów, które podlegały procesom projektowania liniowego, bazującego na gospodarce linearnej. Kurczące się zasoby naturalne oraz zmiany społeczne powodują, że przed procesem projektowania i rozwoju wyrobów pojawiają się dotychczas nieznanne wyzwania.

Projektowanie i rozwój produktu (*Product Design and Development* – PD) to zagadnienie, które łączy mądrość wielu dyscyplin naukowych. Splata w sobie wiedzę marketingową, inżynierską, logistyczną, wytwórczą itd., stanowiąc poważne wyzwanie dla działów badań, rozwoju i innowacji (*Research & Development & Innovation* – R&D&I). Stanowi także spore wyzwanie dla samej organizacji procesu PD, które potrzebując multidyscyplinarnej dyskusji, wymusza konieczność tworzenia zespołów projektowych składających się z pracowników różnych działów przedsiębiorstwa.

Obecny rozwój technologiczny jednak sprawia, że dotychczasowe schematy działania grup projektowych bazujących na np. metodach rozwinięcia funkcji jakości (*Quality Function Deployment* – QFD) czy sposobie projektowania opartym na myśleniu projektowym (*Design Thinking* – DT) ewoluują. Muszą uwzględniać trzy kluczowe elementy, tzn. troskę o środowisko naturalne, konieczność zmiany paradygmatów dotychczasowych modeli biznesowych oraz dynamiczne zmiany technologiczne wywołane czwartą rewolucją przemysłową (I 4.0) i jej technologiami. Niestety, projekty nowych produktów nie są w stanie zatrzymać wojen i migracji, stąd ten kontekst kwestii społecznych został wyłączony z prezentowanego opracowania. Niemniej należy wspomnieć o nowych modelach biznesowych, które powstają wraz ze zmieniającym się społeczeństwem 5.0 (*Society 5.0* – S 5.0<sup>5</sup>).

Wśród wielu koncepcji PD pojawia się ta dotycząca projektowania wspomagającego doskonałość (*Design for eXcellence* – DfX), składająca się z szeregu pojedynczych teorii, metod, technik i narzędzi, których idea koncentruje się na projektowaniu wspomagającym różnorodne aspekty związane ze sferą oczekiwań klienta, aspektem biznesowym organizacji oraz otoczeniem, w którym obydwa podmioty funkcjonują. Koncepcje projektowania wspomagającego wytwarzanie (*Design for Manufacturing* – DfM), montaż (*Design for Assembly* – DfA), jakość (*Design for Quality* – DfQ), logistykę (*Design for Logistics* – DfL), łańcuch dostaw (*Design for Supply Chain* – DfSC) itp. przy tak dynamicznie zmieniającym się

4 <https://businessmodelnavigator.com/explore> [dostęp: 1.12.2023].

5 Y. Zengin, S. Naktiyok, E. Kaygin, O. Kavak, E. Topcuoglu, *An Investigation upon Industry 4.0 and Society 5.0 within the Context of Sustainable Development Goals*, „Sustainability” 2021, vol. 13.

otoczeniu, a także wyzwaniach, które wiążą się ze środowiskiem naturalnym oraz technologiami I 4.0, mogą okazać się niewystarczające.

Wytwarzanie addytywne (*Additive Manufacturing* – AM), tak różniące się od dotychczasowych technik ubytkowych, Internet Rzeczy (*Internet of Things* – IoT), chmura obliczeniowa (*Cloud Computing* – CC), analityka dużych zbiorów danych (*Big Data Analytics* – BDA) łączą systemami cyberfizycznymi (*Cyber-Physical Systems* – CPS) sferę realną z rzeczywistością cyfrową. Pozwala to przypuszczać, że dotychczasowy sposób projektowania produktów, oparty na masowej personalizacji (*Mass Customization* – MC), będzie musiał dostosować się do tych technologii.

Ponadto istnieją także poważne obawy co do zrealizowania do 2030 roku założonych przez ONZ celów zrównoważonego rozwoju<sup>6</sup>. Gospodarka cyrkularna, będąca ekonomiczną odpowiedzią na realizację celów zrównoważonego rozwoju, zwraca uwagę na konieczność stworzenia systemowego rozwiązania odwrotnego przepływu dóbr (*Reverse Logistics* – RL), funkcjonującego zupełnie inaczej, aniżeli miało to miejsce w klasycznych łańcuchach dostaw modelu gospodarki liniowej. Produkty kończące cykl życia powinny być odbierane z rynku i we właściwy sposób zagospodarowane, a recykling (*Recycling*) oraz odzyskanie z nich energii cieplnej (*Recover*) powinno być traktowane jako ostateczność<sup>7</sup>. Zaprezentowane argumenty podkreślają konieczność uwzględnienia kwestii środowiskowych w przemyśle.

Na tle tak nakreślonego kontekstu można stwierdzić, że przed projektowaniem i rozwojem produktów pojawiły się nieznane do tej pory wyzwania. Wymagają one nowego spojrzenia na proces PD, często odchodzącego od dotychczasowych paradygmatów bazujących na dorobku pierwszych trzech rewolucji przemysłowych. Nowoczesne projektowanie wyrobów XXI wieku musi uwzględniać potrzeby środowiskowe, społeczne oraz kierunki zmian technologicznych, przyczyniając się do kreowania inteligentnych produktów w inteligentnym przemyśle. W takim sensie należy rozumieć pojęcie projektowania wspomagającego doskonałość 4.0 (DfX 4.0).

Zaprezentowane argumenty uzasadniają konieczność przeprowadzenia literaturowych badań nad kierunkami i trendami rozwoju PD oraz koncepcji DfX w najnowszych pracach naukowo-badawczych. Kwestia PD połączona z zagadnieniami środowiskowymi i technologicznymi pozwala sformułować następujące pytania badawcze:

- 1) Jakie zagadnienia odgrywają istotne znaczenie w procesie projektowania rozwoju produktów w trzeciej dekadzie XXI wieku?
- 2) Jak definiowana jest sama koncepcja DfX oraz jakie metody są w ramach tej koncepcji wykorzystywane?

6 <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-flagship-publications/w/ks-04-23-184> [dostęp: 1.12.2023].

7 J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer, *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague 2017, s. 5.

- 3) Jak kształtuje się aktywność publikacyjna dotycząca projektowania i rozwoju produktów (PD) w kontekście zagadnień środowiskowych (zrównoważony rozwój, gospodarka o obiegu zamkniętym) oraz jakie są główne nurty teoretyczne omawianego zagadnienia?
- 4) Jak kształtuje się aktywność publikacyjna dotycząca projektowania i rozwoju produktów (PD) w kontekście zagadnień przemysłowych (strategii i wybranych technologii I 4.0: wirtualnej rzeczywistości, Internetu Rzeczy, sztucznej inteligencji) oraz jakie są główne nurty teoretyczne omawianego zagadnienia?
- 5) Jakie są aktualne trendy dotyczące projektowania i rozwoju produktów (PD) w kontekście zagadnień przemysłowych (strategii i wybranych technologii I 4.0: wirtualnej rzeczywistości, Internetu Rzeczy, sztucznej inteligencji) oraz jakie są główne nurty teoretyczne omawianego zagadnienia?
- 6) Jak powinna wyglądać sama koncepcja DfX 4.0?

Tak ze przedstawionych pytań badawczych pozwalają sformułować pięć głównych celów pracy, do których zalicza się:

- 1) wykonanie zintegrowanego i zsyntetyzowanego przeglądu aktualnego stanu wiedzy z obszaru projektowania i rozwoju produktu oraz wykorzystania koncepcji DfX,
- 2) wykonanie badań literaturowych obrazujących procesy projektowania i rozwoju produktów w kontekście aspektów środowiskowych i technologicznych,
- 3) opracowanie przeglądu literatury odnoszącego się do procesów projektowania i rozwoju w kontekście aspektów środowiskowych oraz technologicznych,
- 4) wskazanie aktualnych trendów zmian w procesach projektowania i rozwoju produktu, zidentyfikowania ograniczeń prezentowanego opracowania oraz nakreślenie przyszłych kierunków badań,
- 5) zaproponowanie koncepcji DfX 4.0 wraz z wyzwaniami, które przed nią stoją.

Prezentowane opracowanie udziela odpowiedzi na tak postawione pytania badawcze, realizując tym samym postawione cele. Z tego względu praca ma następującą strukturę. W pierwszej części pojawiają się wybrane zagadnienia dotyczące projektowania i rozwoju produktów oraz opis koncepcji projektowania wspomagającego doskonałość. Poruszona zostaje problematyka aspektów środowiskowych i technologicznych związanych z projektowaniem i rozwojem produktu. Druga część pracy przedstawia wyniki badań literaturowych nad omawianymi zagadnieniami. W trzeciej i czwartej zaprezentowano przegląd badanej w drugiej części literatury, identyfikując najnowsze trendy w obszarach środowiskowym i technologicznym. Z kolei piąta część pracy odsłania autorską koncepcję DfX 4.0 wraz z uwarunkowaniami jej funkcjonowania oraz wyzwaniami, które przed nią stoją. Pracę kończy podsumowanie, w którym zawarto wnioski z przeglądu literatury oraz ograniczenia prezentowanego opracowania, a także wskazano przyszłe kierunki badań.

## Rozdział 1

# Projektowanie i rozwój produktów wspomagające doskonałość

Koncepcja projektowania wspomagającego doskonałość (*Design for eXcellence* – DfX) nie jest w swoim pojęciu i istocie jednorodna. Wynika to z faktu, że składa się na nią szereg specyficznych metod projektowania i rozwoju produktów (*Product Design & Development* – PD), w których to kontekst procesu projektowego stanowi kluczowy element. Należy zauważyć, że często wiąże się on z rozwojem przemysłu oraz z kwestiami dostosowania zarządzania organizacjami do zmieniającego się otoczenia. Niemniej istotne są tu także wymagania klientów, które projektowane wyroby powinny spełniać. DfX uwzględnia też sam cykl życia produktów, wpisując w projektowane wyroby cechy, właściwości i funkcjonalności użyteczne nie tylko dla klienta, ale również i dla wszystkich mających styczność z produktem (np. podmiotów obsługujących wyroby w ramach serwisu czy też je utylizujących).

Istota DfX bazuje na szeregu pojęć, które od czasu drugiej rewolucji przemysłowej, często symbolicznie utożsamianej z uruchomieniem linii montażowej Forda, kształtowały rozwój przemysłu. Każdy z wyrobów, który trafiał na rynek, poddawany był procesom projektowania lub kopiowania. Miały one różnorodne formy i nazewnictwo – od szpiegostwa przemysłowego poczynając, poprzez analizy porównawcze typu Benchmarking, na modelu biznesowym inżynierii odwrotnej (*Reverse Engineering* – RE)<sup>1</sup> kończąc.

Aby właściwie zrozumieć koncepcję DfX, należy w pierwszej kolejności zwrócić uwagę na wybrane zagadnienia związane z projektowaniem i rozwojem produktu. Mowa tu jedynie o niektórych kwestiach, ponieważ sam proces projektowania produktu w swojej istocie jest tak wielodyscyplinarny i wielokontekstowy, że podjęcie próby opisanie wszystkich aspektów związanych z PD, zdaniem autora, okazuje się w praktyce niemożliwe. Niemniej przybliżenie czytelnikowi pewnych treści teoretycznych pozwoli właściwie osadzić koncepcję DfX, a przez to ułatwi jego zrozumienie.

---

1 <https://businessmodelnavigator.com/explore> [dostęp: 13.12.2023].

## 1.1. Wybrane zagadnienia z obszaru projektowania i rozwoju produktów

Pojęcie i istota projektowania wspomagającego doskonałość jest trudna do jednoznacznego scharakteryzowania. Wynika to z szeregu rozbieżności pomiędzy poszczególnymi metodami składowymi wchodzącymi w skład całej koncepcji, a także zmieniającymi się uwarunkowaniami projektowania wyrobów. Z pewnością wywodzi się ona z projektowania i rozwoju produktu. Zrozumienie istoty DfX wymaga zatem zaprezentowania wybranych zagadnień z obszaru PD, które w pewien sposób naświetlą omawianą problematykę. Zaliczono do nich następujące kwestie:

- wzornictwo przemysłowe (*Industrial Design – ID*),
- cykl życia produktu (*Product Life Cycle – PLC*),
- zarządzanie wiedzą (*Knowledge Management – KM*),
- inżynierię współbieżną (*Concurrent Engineering – CE*),
- zestawy narzędzi komputerowego wspomagania (*Computer Aided – CAX*) oraz komputerowej integracji systemów CAX (*Computer Integrated – CIX*).

Pierwsze z wybranych zagadnień to wzornictwo przemysłowe, którego tematyka była już poruszana w pierwszej połowie XX wieku. Wraz z rozwojem przemysłu, co wiązało się z rewolucyjną linią montażową Forda, zaczęły powstawać stowarzyszenia, które najpierw zrzeszały się wokół wybranych cechów rzemiosła lub branż przemysłowych (branża meblarska), aby następnie przekształcać się w niezależne instytuty lub stowarzyszenia odnoszące się do tego zagadnienia.

W 1965 roku, po blisko 10 latach negocjacji, powołano w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej Stowarzyszenie Projektantów Przemysłowych Ameryki (*The Industrial Designer Society of America – IDSA*), które połączyło ze sobą Instytut Wzornictwa Przemysłowego USA (*The Industrial Design Institute – IDI*), Amerykańskie Stowarzyszenie Wzornictwa Przemysłowego (*The American Society of Industrial Design – ASID*) oraz Stowarzyszenia Edukacji Wzornictwa Przemysłowego USA (*The Industrial Design Education Association – IDEA*). Pierwszym przewodniczącym powołanego stowarzyszenia był właśnie Dreyfuss<sup>2</sup>. On to w 1955 roku zaprezentował w swojej książce *Design for People*<sup>3</sup> cele wzornictwa przemysłowego. W ramach uwzględnionych w swojej publikacji przykładów zaproponował miernik składający się z pięciu podstawowych parametrów, które były wynikiem prawie dwudziestopięcioletniego doświadczenia w procesie projektowania produktów. Zaliczył do nich:

- łatwość użytkowania i bezpieczeństwo (bezpieczeństwo jest naturalnym następstwem użyteczności, wskazać tutaj można łatwość realizacji podstawowych operacji, instrukcję obsługi, możliwość kontroli wizualnej, widoczność, stabilność itp.),

<sup>2</sup> <https://www.idsa.org/about-idsa/our-story/> [dostęp: 14.03.2023].

<sup>3</sup> H. Dreyfuss, *Designing for People*, Simon and Schuster, New York 1955, s. 178–183.



- łatwość utrzymania w ruchu (łatwość wykonywania codziennych czynności serwisowych, możliwość sprawnego przeprowadzania bieżących przeglądów i napraw, a także remontów kapitalnych, koszty związane z tymi działaniami),
- optymalizację kosztów (każdy projektant musi być świadomy kosztów wytwarzania i dystrybucji; co więcej, poprzez projektowanie dodatkowego specjalistycznego oprzyrządowania może te koszty redukować),
- atrakcyjność produktu w kontekście sprzedaży (nieuchwytna i psychologiczna wartość produktu, produkt powinien być wyrażony poprzez fakturę, strukturę, prostotę i prawdziwość – stanowi on swoiste połączenie odczuć klienta dotyczących produktu w jego dotyku, operowaniu nim oraz w innych czynnościach z nim związanych),
- wygląd (forma, wzór, proporcje, linie, kolory, oryginalność).

Wynika stąd, że problematyka wzornictwa przemysłowego znana jest już od przynajmniej wieku, a kolejne lata rozwoju przemysłu poszerzają tylko zasoby wiedzy na temat tego zagadnienia.

W Polsce jednostką zajmującą się wyżej wymienionymi zagadnieniami jest Instytut Wzornictwa Przemysłowego. Powstał on w 1950 roku, a jego pierwszym dyrektorem była Wanda Telakowska. Główne zadania instytutu wynikały poniekąd z rzeczywistości, w której funkcjonował, tzn. gospodarki planowanej centralnie. Zamykały się one w prowadzeniu prac naukowo-badawczych, których zasadniczymi celami były podniesienie poziomu estetyki produkcji oraz opracowanie wytycznych w zakresie wzornictwa przemysłowego dla gospodarki planowej. W ramach instytutu nakreślono trzy podstawowe nurty upowszechniania wzornictwa poprzez:

- wydawnictwa i wystawy,
- edukację,
- badania i projekty badawcze<sup>4</sup>.

Na podstawie zaprezentowanych faktów dość obiektywnie można określić cele wzornictwa przemysłowego w nieskalanej konfliktom II wojny światowej Ameryce Północnej oraz Polsce będącej pod protektorem Związku Radzieckiego. Z łatwością da się zauważyć, że były one zgoła odmienne. Na skalę gospodarczą rozwój wzornictwa przemysłowego zdecydowanie szybciej zaznaczał swoją użyteczność w USA niż w Polsce. Koncepcja ID prezentowana w Stanach Zjednoczonych wyznaczała już wtedy zręby uwzględniania w projektowaniu wyrobów takich kwestii jak produkcja czy też dystrybucja, a to zwracało uwagę projektantów na konieczność poszukiwania kompromisu pomiędzy różnymi aspektami tego procesu.

Ze względu na złożoność tematyki samo pojęcie wzornictwa przemysłowego jest także różnie definiowane. Ulrich i Eppinger<sup>5</sup> w swojej książce poświęcają temu zagadnieniu cały rozdział dotyczący wzornictwa przemysłowego. Autorzy, powołując się na IDSA, zdefiniowali wzornictwo przemysłowe jako wysoce sprofesjonalizowany

4 <https://instytutwzornictwa.com/historia/> [dostęp: 14.04.2023].

5 K. Ulrich, S. Eppinger, *Product Design and Development*, 5<sup>th</sup> ed., New York 2012.



proces rozwoju koncepcji, specyfikacji, optymalizacji funkcji, wartości oraz wyglądu produktów wraz z systemami okołoproductowymi w celu uzyskania obopólnej korzyści zarówno dla użytkownika, jak i producenta. Wskazali oni jednocześnie na rozległość definicji ujmującej także kwestie całego zespołu projektowego. Wyróżnili dwa podstawowe wymiary projektowania przemysłowego, tzn. ergonomiczny (obejmujący wszystkie aspekty produktu powiązane ze „współpracą” człowiek–produkt) oraz estetyczne (wizualne, łączące się z posiadaniem, marką itp.).

Należy mieć jednak świadomość, że projektanci przemysłowi odpowiadają głównie za wszystkie te cechy i właściwości produktu, których doświadcza użytkownik (estetyka, ergonomia, funkcjonalność, odporność itp.). Wzornictwo przemysłowe przez długi okres traktowane było jako mało istotny czynnik projektowania wyrobów. Producenci koncentrowali się głównie na wytwarzaniu, starając się poprzez opakowanie zachęcić do nabywania produktów. Brak świadomości co do oczekiwanych potrzeb klientów, którzy w sposób całościowy patrzą na nabywany produkt, skutkowało często nieakceptacją przez nich produktu na rynku. Coraz częściej zatem się okazywało, że konkurencyjność technologiczna w tak zglobalizowanym rynku przy wysoce spersonalizowanych wymaganiach nabywców nie pozwala osiągnąć sukcesu rynkowego<sup>6</sup>.

Z kolei Alonso-Garcia i inni<sup>7</sup> podają za Maldonado<sup>8</sup>, że proces projektowania przemysłowego (formy przemysłowej) jako nieautonomiczna działalność wiąże się z zarządzaniem (planowaniem, koordynowaniem, integrowaniem, kontrolowaniem, artykułowaniem itp.) szeregiem czynników, które należy uwzględnić przy konstruowaniu wyrobu. Mają one charakter funkcjonalny, symboliczny, kulturowy, techniczno-ekonomiczny, konstrukcyjny, systematyczny, produkcyjny lub dystrybucyjny. Działania koordynacyjne, integracyjne i artykulacyjne, związane z różnorodnymi czynnikami, są zawsze silnie uwarunkowane poprzez relacje pomiędzy produkcją a potencjalnymi zachowaniami nabywczych klientów, uwarunkowanymi cechami danych społeczności. Wynika z tego, że cele wzornictwa przemysłowego są ustalane według trzech różnych aspektów: technicznych, funkcjonalnych oraz społecznych. W ten sposób sam proces projektowania zawiera w sobie wielodyscyplinarną wiedzę z zakresu inżynierii, nauk społecznych i sztuki.

Jak podają Gay i Samar<sup>9</sup> za Alonso-Garcia i innymi<sup>10</sup>, to, co odróżnia ID od jego poprzednika, czyli rzemieśnictwa, to dokonanie rozdziału koncepcji i produkcji na dwa różne działania, które są w pewien sposób zależne od projektantów

6 Tamże, s. 209–214.

7 M. Alonso-Garcia, O.D. de Cozar Macias, E.B. Blázquez-Parra, *Viability of Competencies, Skills, and Knowledge Acquired by Industrial Design Students*, „International Journal of Technology and Design Education” 2021, vol. 31, s. 545–546.

8 T. Maldonado, *Diseño Industrial Reconsiderado*, Barcelona 1993.

9 A. Gay, L. Samar, *El diseño Industrial en la Historia*, Córdoba 1994.

10 M. Alonso-Garcia, O.D. de Cozar Macias, E.B. Blázquez-Parra, *Viability of Competencies...*, s. 546.

i specjalistów. Nie oznacza to jednak zwolnienia projektanta z wykorzystywania w procesie projektowania wiedzy z innych obszarów, a przede wszystkim z produkcji. Jest to obligatoryjne, jeśli chodzi o zagwarantowanie optymalizacji kosztów projektowanego wyrobu.

Wzrost znaczenia wzornictwa przemysłowego wynikał bezpośrednio ze zwiększenia się masowości produkcji. Zakłady rzemieślnicze, posiadające często uniwersalne maszyny i urządzenia, nie miały możliwości przekazywania na rynek dużych wolumenów produktów, na które czekali nabywcy. Niemniej należy mieć świadomość, że ci sami rzemieślnicy często realizowali własne projekty, uwzględniając znane im ograniczenia wytwórcze.

W dobie produkcji masowej, wykorzystującej już od lat osiemdziesiątych koncepcje szczupłego wytwarzania (*Lean Manufacturing* – LMf)<sup>11</sup>, promującego tylko operacje przynoszące wartość dodaną, organizacja procesów produkcyjnych, a także sama ich technologia uległy znaczącemu postępowi. Oznacza to, że projektanci realizujący proces projektowania produktu w coraz mniejszym stopniu (w przeciwieństwie do dawnych rzemieślników) rozumieją organizację procesów technologicznych, transportowych, magazynowanych i kontrolnych. Stąd na początku drugiej połowy XX wieku powstawały na dużą skalę podręczniki pozwalające usystematyzować i zebrać wiedzę zawierającą np. kwestie uwarunkowań wytwarzania, które następnie mogłyby być wykorzystywane przez projektantów<sup>12</sup>.

Problematyka DfX nierozdzielnie związana jest także z pojęciem cyklu życia produktu (wyrobu). Pierwsze teorie na ten temat pojawiły się w latach sześćdziesiątych za sprawą Levitta, Coxa oraz Poliięgo i Cooka i odnosiły się one głównie do sfery marketingowej.

Pierwszy z autorów, Levitt, zaproponował marketingowe ujęcie cyklu życia produktu<sup>13</sup>, charakteryzując jego cztery podstawowe fazy (rysunek 1):

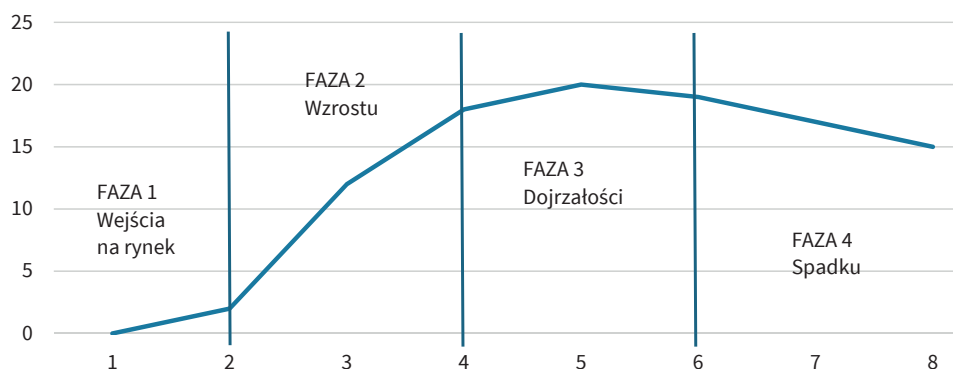
- 1) wejścia (rozwoju) produktu na rynek – nowy produkt na rynku, powstały według prognoz, brak potwierdzonego popytu, niezwyfikowany przez nabywców, przez co mogący posiadać szereg elementów do poprawy, popyt na ten produkt zaczyna się powoli,
- 2) wzrostu sprzedaży produktu (gwałtowny wzrost popytu),
- 3) dojrzałości (stabilizacja popytu, tworzenie rodzin produktu),
- 4) spadku sprzedaży (produkt traci konsumentów, więc jego popyt spada)<sup>14</sup>.

11 J. Womack, D. Jones, *Lean Thinking, Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, London 1996; J. Womack, D. Jones, *Odchudzanie firm. Eliminacja marnotrawstwa kluczem do sukcesu*, Centrum Informacji Menedżera, Warszawa 2001.

12 *GE – Manufacturing Producibility Handbook*, General Electric Co., Manufacturing Services, Schenectady, New York 1960; G. Boothroyd, P. Dewhurst, *Product Design and Assembly, Designer Handbook*, Amherst 1983.

13 T. Levitt, *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review” 1965, No. 11–12, s. 81–94.

14 Tamże, s. 82.



**Rysunek 1.** Cykl życia produktu przykładowej branży

**Źródło:** T. Levitt, *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review” 1965, No. 11–12, s. 82.

Levitt zwrócił także uwagę, że faza dojrzałości umożliwia dodawanie do produktu kolejnych wartości, które mogą spowodować przedłużanie cyklu jego życia<sup>15</sup>, a krzywe popytu dla kolejnych faz nie są identyczne dla każdego produktu.

Podobnie jak Levitt marketingowy cykl życia produktu (*Marketing Product Life Cycle* – M-PLC) opisał także Cox<sup>16</sup>. Prowadząc swoje badania na 258 produktach farmaceutycznych w latach 1955–1959, zauważył on różnorodność krzywych PLC. Na tej podstawie wyróżnił sześć podstawowych typów<sup>17</sup>. Z kolei Polli i Cook<sup>18</sup> uzupełnili badania Levitta. Zwrócili uwagę na kwestie definicji samego produktu i jego podziału pod kątem klas oraz względnego wpływu popytu w odniesieniu do podażowych czynników sprzedaży, wykazując najlepsze wyniki tam, gdzie dominują czynniki popytowe<sup>19</sup>.

Należy zauważyć, że obecnie cykl życia wyrobu uległ znacznemu skróceniu. Zmieniające się potrzeby klientów, zmierzające do wysokiej personalizacji produktów, sprawiają, że popyt konsumentów na wybrane produkty staje się niepewny. Ma to ewidentnie wpływ na cykl życia wyrobów, szczególnie na kwestie PD.

Tiben-Lembke poszerza nieco etapy cyklu życia produktu o jego rozwój występujący przed fazą wejścia na rynek oraz kasacji po fazie spadku. W ten sposób autor zwraca uwagę na dwa aspekty – proces projektowania produktu, który wydaje

15 Dobrym przykładem może być polski samochód marki Polonez, który od momentu rozpoczęcia produkcji (1978) do momentu jej zakończenia (2002) praktycznie nie zmienił swojej bazowej bryły w wersji pięciodrzwiowej – *hatchback*.

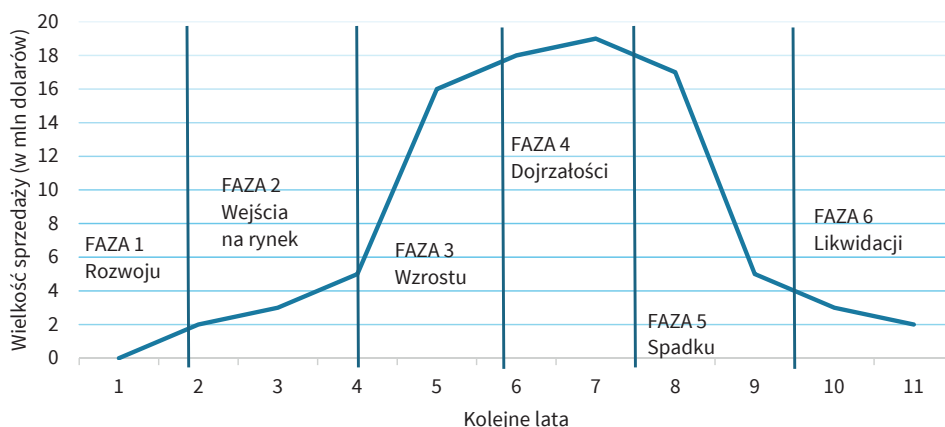
16 W. Cox, *Product Life Cycles as Marketing Models*, „The Journal of Business” 1967, vol. 40, No. 4, s. 375–384.

17 Tamże, s. 382.

18 R. Polli, V. Cook, *Validity of the Product Life Cycle*, „The Journal of Business” 1969, vol. 42, No. 4, s. 385–400.

19 Tamże.

się niezmiernie istotny w całym cyklu jego życia, oraz proces kasacji w kontekście odpowiedzialności producenta za towary, które z różnych powodów kończą swój cykl życia (rysunek 2)<sup>20</sup>.



**Rysunek 2.** Fazy cyklu życia produktu wg Tibben-Lembkego

**Źródło:** R. Tibben-Lembke, *Life after Death: Reverse Logistics and The Product Life Cycle*, „International Journal of Physical Distribution & Logistics Management” 2002, vol. 32, No. 3, s. 227.

Wspomniany autor zwraca szczególną uwagę na kwestię logistyki odwrotnej, którą razem z Rogersem zdefiniowali jako proces planowania, wdrażania i kontrolowania (a więc zarządzania) efektywnego (w tym także kosztowo) przepływu surowców i materiałów, zapasów w toku oraz wyrobów gotowych wraz z informacjami na ich temat z punktu konsumpcji do punktu ich wprowadzenia na rynek w celu odzyskania, wykreowania wartości lub – ostatecznie – właściwego usunięcia<sup>21</sup>.

Z kolei Cao i Folan zwracają uwagę także na inżynierski kontekst cyklu życia produktu – inżynierię cyklu jego życia (*Engineering Product Life Cycle* – E-PLC)<sup>22</sup>. Badania nad tym podejściem rozpoczęły się w późnych latach sześćdziesiątych XX wieku wraz z pojawieniem się pojęć rachunku kosztów cyklu życia produktu (*Life Cycle Costing* – LCC) oraz jego oceny (*Life Cycle Assessment* – LCA). W latach osiemdziesiątych koncepcje te zostały wzbogacone o systemy komputerowego wspomagania CAX, które w kolejnej fazie przechodziło w ich integrację. Europejska dyrektywa dotycząca opakowań i gospodarki odpadami opakowaniowymi (EU, *Directive 85/339/EEC*) przyspieszyła włączanie do tematyki projektowania nowych

20 R. Tibben-Lembke, *Life after Death: Reverse Logistics and The Product Life Cycle*, „International Journal of Physical Distribution & Logistics Management” 2002, vol. 32, No. 3, s. 227–228.

21 D. Rogers, R. Tibben-Lembke, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reverse Logistics Executive Council, 1998, s. 2.

22 H. Cao, P. Folan, *Product Life Cycle: The Evolution of a Paradigm and Literature Review from 1950–2009*, „Production Planning and Control” 2011, vol. 23(8), s. 652.

uwarunkowań związanych ze środowiskiem naturalnym. Równolegle pojawiały się inne koncepcje projektowania skoncentrowane np. na demontażu czy recyklingu, a w połowie lat dziewięćdziesiątych dokonano próby ich połączenia w szerszą koncepcję DfX.

W 2003 roku Kiritsis i współautorzy<sup>23</sup>, uczestniczący w konsorcjum PROMISE, wskazali możliwość kształtowania wartości produktu na różnych płaszczyznach, do których zaliczyli poziomy:

- techniczny (optymalne zaspokajanie realnych i potencjalnych potrzeb klienta przy wykorzystaniu wiedzy zebranej w trakcie cyklu życia produktu),
- ekonomiczny (kreowanie wartości dla producenta – lepszy produkt, lepszy CRM; usługodawcy – nowe szanse biznesowe, lepszy CRM; dla nabywcy, właściciela produktu – wydłużona żywotność produktu),
- środowiskowy (minimalizacja zanieczyszczeń, zużycia zasobów i konsumpcji energii poprzez zastosowanie optymalnych rozwiązań w cyklach życia systemów produktów),
- społeczny (scharakteryzowany poprzez takie cechy jak komfort, bezpieczeństwo i satysfakcja użytkownika produktu lub usługi).

Wspomniani autorzy zdefiniowali cykl życia systemów produktów poprzez trzy podstawowe fazy, tzn. fazę:

- 1) początku życia produktu (*Beginning-of-Life* – BoL), zawierającą w sobie procesy projektowania i produkcji – koncepcja produktu, projektowanie wstępne i szczegółowe, wytwarzanie i montaż wraz ze wstępną dystrybucją,
- 2) środka życia produktu (*Middle-of-Life* – MoL), zawierającą w sobie właściwe użytkowanie produktu, serwis oraz konserwację – dostarczenie do klienta końcowego, użytkowanie i eksploatacja produktu, serwisowanie, naprawianie, dostarczanie części zamiennych, zapewnienie wsparcia,
- 3) końca życia produktu (*End-of-Life* – EoL), którą mogą charakteryzować różnorodne scenariusze wykorzystujące ponownie ten sam produkt lub jego komponenty, części, materiały na utylizacji; efektem końcowym może być dostarczenie energii lub jej brak.

Nawiązując do zaprezentowanego podziału, Urban<sup>24</sup> i współautorzy zauważyli, że obecny proces PD może być zaprezentowany według następującego modelu składającego się z przedstawionych niżej etapów:

- przedrozwojowego (analizie podlegają uwarunkowania rynkowe, które są łączone ze strategią przedsiębiorstwa, strategiczne planowanie produktu oraz planowanie samego projektu – analiza potrzeb oraz definiowanie założeń),

23 D. Kiritsis, A. Bufardi, P. Xirouchakis, *Research Issues on Product Lifecycle Management and Information Tracking using Smart Embedded Systems*, „Advanced Engineering Informatics” 2003, vol. 17, No. 3, s. 189–191.

24 W. Urban, K. Lukaszewicz, E. Krawczyk-Dembicka, *Application of Industry 4.0 to the Product Development Process in Project-Type Production*, „Energies” 2020, vol. 13(21).

- rozwojowego (projekty informacyjne, koncepcyjne, szczegółowe, przygotowanie produkcji wyrobu oraz dostarczenie produktu na rynek – modelowanie, prototypowanie oraz testowanie produktu),
- porozwojowego (monitorowanie użytkowania produktu oraz jego wycofanie z rynku – wytwarzanie, modernizowanie, naprawianie oraz utylizacja)<sup>25</sup>.

Zaprezentowany podział nawiązuje w pewnym sensie do trójstopniowego podziału cyklu życia produktu (BoL, MoL, EoL), przesunięto w nim jednak nieco środków ciężkości poszczególnych działań.

Cao i Folan<sup>26</sup> połączyli cykl życia systemów produktów z wybranymi działaniami gospodarki cyrkularnej opisywanymi np. przez Pottinga i współautorów<sup>27</sup> w ramach prezentacji przejścia z gospodarki liniowej (*Linear Economy* – LE) na gospodarkę obiegu zamkniętego (*Circular Economy* – CE). Należy tu wskazać na takie kategorie jak: odzyskać, poddawać recyklingowi, zmienić przeznaczenie, regenerować, odnawiać, naprawiać, ponownie używać, redukować, przemyśleć i odrzucić dotychczasowy sposób myślenia. Koncepcja ta określana jest jako 10R: *Recover, Recycle, Repurpose, Remanufacture, Refurbish, Repair, Reuse, Reduce, Rethink, Refuse* (rysunek 3).

W ramach przeglądu literatury odnoszącego się do tematyki cyklu życia produktu spotyka się także pojęcie zarządzania cyklem życia produktu (*Product Life Cycle Management* – PLM)<sup>28</sup>. Jak opisują Ameri i Dutta<sup>29</sup>, koncepcja PLM pojawiła się na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Jej nadrzędnym celem było uwzględnienie pozainżynierskich kwestii projektowania produktów w ramach spójnej platformy wymiany informacji. Generowanie, dystrybuowanie i organizacja całego systemu informacyjnego związanego z PLC od fazy pomysłu aż do wycofania produktu z rynku (nazywana często „od kołyski aż po trumnę”; *Cradle to The Grave* – CtG) w przedsiębiorstwie uwzględnia w procesie PD, poza projektem i produkcją, również inne obszary funkcjonalne organizacji, takie jak sprzedaż, marketing czy też obsługę posprzedażną. W ten sposób wypełniona zostaje luka pomiędzy procesami biznesowymi przedsiębiorstwa a procesami rozwoju produktu. PLM posiada ważny element wyróżniający go na tle samego procesu PD, a mianowicie zarządzanie wiedzą (*Knowledge Management* – KM). O ile zatem proces zarządzania rozwojem produktu (*Product Development Management* – PDM) skupia się na zarządzaniu danymi, o tyle PLM koncentruje się na zarządzaniu identyfikacją, przechwytywaniem, dzieleniem się i ponownym wykorzystaniem wiedzy w całym cyklu życia produktu.

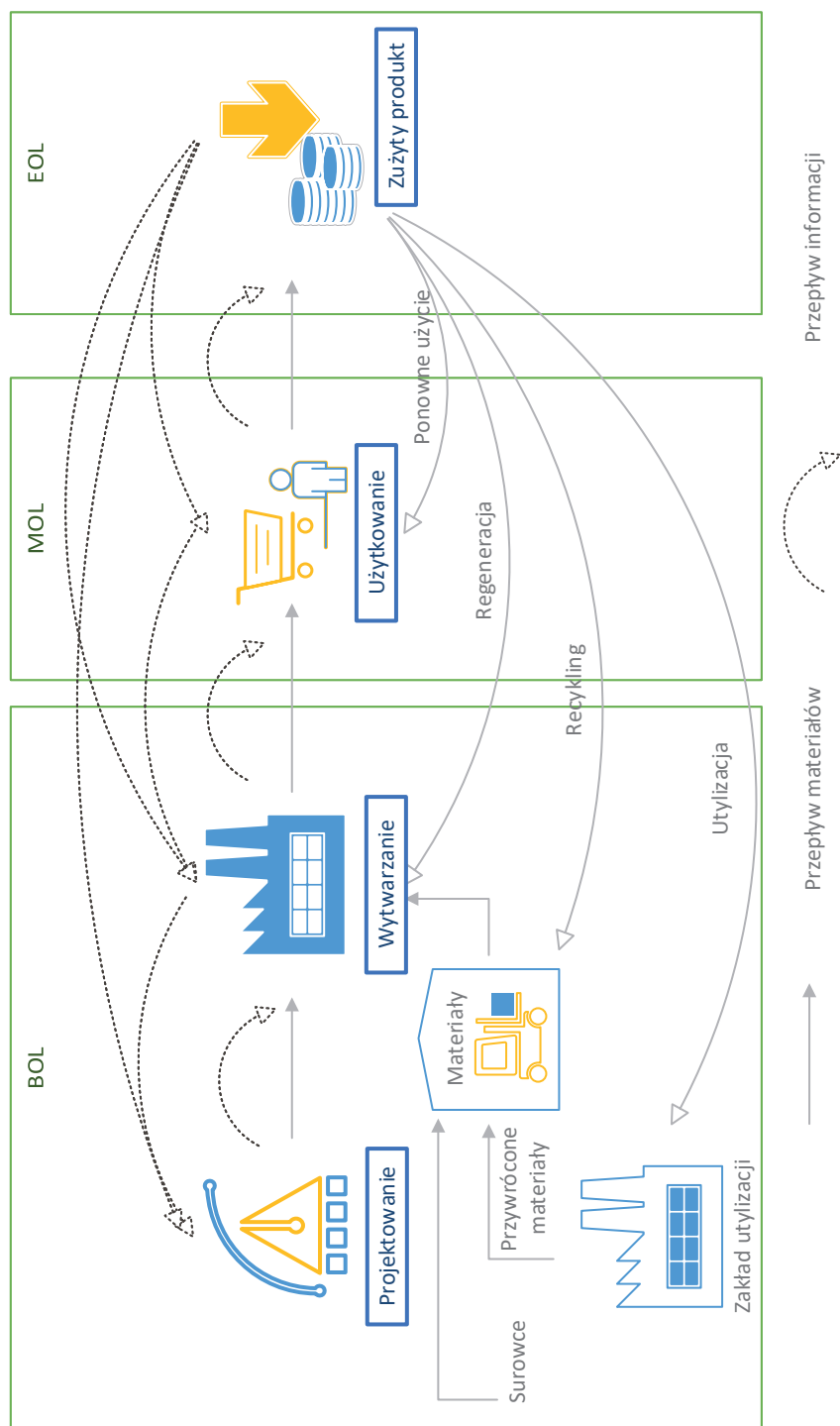
25 Tamże, s. 4–5.

26 H. Cao, P. Folan, *Product Life Cycle...*, s. 656–657.

27 J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer, *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*, PBL, The Hague 2017, s. 5.

28 A. Riou, Ch. Mascle, *Assisting Designer Using Feature Modeling for Lifecycle*, „Computer-Aided Design” 2009, vol. 41, Issue 12, s. 1037.

29 F. Ameri, D. Dutta, *Product Lifecycle Management: Closing the Knowledge Loops*, „Computer-Aided Design and Applications” 2005, vol. 2(5), s. 578–579.



**Rysunek 3.** Przepływ materiałów i informacji w ramach cyklu życia systemów produktów z wykorzystaniem działań gospodarki o obiegu zamkniętym  
**Źródło:** H. Cao, P. Folan, *Product Life Cycle: The Evolution of a Paradigm and Literature Review from 1950–2009*, „Production Planning and Control” 2011, vol. 23(8), s. 655.



Wspomniane wcześniej zarządzanie wiedzą zostało nieco szerzej opisane przez Housela i Bella w książce *Measuring and Managing Knowledge*<sup>30</sup>. W pierwszym rozdziale publikacji, odnoszącym się do parametrów zarządzania wiedzą, autorzy ukazali pewne aspekty samej wiedzy, które powinno się uwzględniać. Zgodnie w tym wiedza:

- **może się urodzić** – może wynikać np. z doświadczeń ludzi, ale także z ich współpracy z maszynami; coraz częściej algorytmy i systemy eksperckie (*Expert System* – ES) czy też sztuczna inteligencja (*Artificial Intelligence* – AI), oparte na wkładzie wiedzy człowieka, tworzą znacznie szybciej swoje struktury wiedzy, które mogą być wykorzystywane przez ludzi; zarządzanie wiedzą musi uwzględniać zarówno bezpośrednią, jak i pośrednią wiedzę ludzi i maszyn,
- **może umrzeć** – w przysłowiu „nie ma ludzi niezastąpionych” czai się pewna pułapka; większość ludzi, gdy umiera, zabiera ze sobą ogrom zdobytej przez życie wiedzy, której fragmentami dzieli się poprzez opowieści, wychowanie, a także książki bądź inne formy przekazu; dla organizacji „śmiercią” człowieka mogą być zwolnienia pracowników, które z punktu widzenia kosztów optymalizują wynik końcowy działalności, niemniej zbliżają się do „śmierci” przedsiębiorstwa w kontekście utraty wiedzy, która jest trudna do odtworzenia – wiedza rezyduje w ludzkich głowach; wiedza umiera też wtedy, kiedy nie jest wykorzystywana, przez co tworzy tzw. martwą wiedzę,
- **może być własnością** – wiedza jako własność pozwala uzyskiwać przez przedsiębiorstwa przewagę konkurencyjną; fenomen niektórych napojów gazowanych tkwi w ich recepturze, a więc wiedzy, jak je wykonać; pracownicy często podpisują aneksy umów, w których to gwarantują organizacji, że cała zgromadzona, odkryta lub opracowana wiedza pozostaje, nawet po zakończeniu zatrudnienia, w gestii pracodawcy; z kolei większość rzemieślników utrzymuje swoją wiedzę w ukryciu, bojąc się, że gdy ją zdradzą, stworzą sobie konkurencję; takie rozwiązania jak *benchmarking* czy też odwrotna (wsteczna) inżynieria produktów (*Products Reverse Engineering* – PRE<sup>31</sup>) stanowią w wielu przypadkach sposób przejęcia wiedzy będącej cudzą własnością; współczesne organizacje mają świadomość, jaka część wiedzy stanowi ich kluczowe kompetencje i powinna być chroniona, będąc dla nich źródłem przewagi konkurencyjnej,
- **jest zarówno immanentna, jak i istniejąca** – wiedza immanentna w odróżnieniu od istniejącej, powszechnie dostępnej, bazuje na liczbie doświadczeń, refleksji, zapamiętanych faktów czy też wreszcie intuicji, nie zawsze jest ona szeroko dostępna, pomimo to może być przywołana w konkretnym momencie; problemem organizacji często bywa odtworzenie wiedzy immanentnej, która niejednokrotnie gromadzona jest indywidualnie przez pracowników,

30 T. Housel, A. Bell, *Measuring and Managing Knowledge*, New York 2001, s. 4–11.

31 Demontaż produktu w celu zrozumienia idei jego działania oraz identyfikacji poszczególnych części, podzespołów, materiałów itp.



- **może być przechowywana** – wiedza jest gromadzona w głowach ludzi i jako taka przekazywana z pokolenia na pokolenie, w bibliotekach, opisana w skryptach i pierwszych księgach, w architekturze, kulturze, doświadczeniach osób uczestniczących w niecodziennych wydarzeniach; w chwili obecnej Internet stał się praktycznie nieograniczoną bazą wiedzy, wielką biblioteką, czynną 24 godziny na dobę, do której można wejść wszędzie tam, gdzie jest możliwość podłączenia się do sieci; te olbrzymie zbiory wiedzy generują coraz częściej problemy z jej odszukaniem, odseparowaniem „śmieci informacyjnych” od danych istotnych; udało się zatem przekazać wiedzę do światowej sieci, ale jednocześnie ludzkość póki co nie potrafi znaleźć sposobu szybkiego przywracania jej do naszych głów; krytycy twierdzą, że Internet może stanowić eksternalizację ludzkich umysłów, jeśli problem dostępności do wiedzy nie zostanie rozwiązany,
- **może być kategoryzowana** – kategoryzowanie bazuje na logice, a jego nadrzędnym celem jest kwestia dostępności, coraz częściej odkładane jest do przyszłowiego lamusa; niejednokrotnie żargon (slang) korporacyjny, naukowy itp., bazujący na etykietach, tagach, czyli wymyślnej nowomowie, o której wspominał Orwell w swej powieści *Rok 1984*<sup>32</sup>, utrudnia pozyskanie informacji, czyniąc ten proces w sposób zamierzony lub niezamierzony niemożliwym do zrealizowania; idea samej kategoryzacji polega na ułatwianiu dostępu, ale obserwując obecną rzeczywistość, coraz częściej można ulec wrażeniu, że im trudniejsze stosuje się rozwiązanie, tym lepiej jest ono oceniane.

Sama wiedza istniejąca w organizacji może przybierać formę wiedzy jawnej lub ukrytej. Ta pierwsza oznacza rodzaj wiedzy łatwy do pozyskania. Jest on wyartykułowany, skodyfikowany, ustrukturalizowany, przekazany i udostępniony poprzez różnorodne formy przekazu, np. skrypty, podręczniki, platformy wiedzy, zdjęcia, diagramy, wykresy, arkusze informacyjne. Z kolei wiedza ukryta fizycznie istnieje w umysłach pracowników jako zdolności, umiejętności czy też pomysły. Ten rodzaj może być przekazywany poprzez chociażby proces interakcji pracowniczej, a więc rozmowy pomiędzy ludźmi mające na celu przekazanie wiedzy jednego z pracowników na drugiego. Wiedza ukryta przekazywana może być także poprzez wymianę doświadczeń czy też wspólne praktyki pozwalające obserwować działania i postawy<sup>33</sup>.

Jak zauważają Ameri i Dutta<sup>34</sup>, zmiany łączące się z przejściem paradygmatów przemysłowych z technologicznych na te związane z informacją powodują wzrost znaczenia wiedzy jako elementu przewagi konkurencyjnej. Samo pojęcie „wiedza” często jest traktowane jako synonimiczne z dwoma innymi – informacją i danymi, choć wydaje się, że określenia te raczej pozostają ze sobą we wzajemnej relacji, pozwalając zidentyfikować pewne rozróżnienia. Dane stanowią nieprzetworzone,

32 G. Orwell, *Rok 1984*, Warszawa 2013.

33 E. Byukusenge, J. Munene, *Knowledge Management and Business Performance: Does Innovation Matter?*, „Cogent Business & Management” 2017, vol. 4(1), s. 3.

34 F. Ameri, D. Dutta, *Product Lifecycle Management: Closing...*, s. 578–579.

niezinterpretowane, niezorganizowane fakty, które pozyskuje się często przy wykorzystaniu różnorodnych metod badawczych. Przetwarzanie i agregacja pozyskanych danych tworzą informację, która z kolei poprzez jej analizę i ocenę staje się wiedzą. Zapisywanie, przechowywanie, organizowanie i inne procesy, przeprowadzane na danych czy informacjach, są znacznie łatwiejsze aniżeli realizacja tych samych procesów na wiedzy. Sama wiedza wykorzystywana jest na ogół podczas podejmowania decyzji oraz rozwiązywania problemów. Autorzy stwierdzili, że jej generowanie w formie możliwym do ponownego wykorzystania (a więc w formie zorganizowanej i ustrukturyzowanej, dostępnej dla pracowników organizacji) z wiedzy niezorganizowanej i nieustrukturyzowanej (czyli z formy milczącej, zawartej w głowach pracowników do jawnej, osiągalnej dla członków organizacji) stanowi jeden z kluczowych elementów zarządzania wiedzą.

Samo KM zakłada dzielenie się wiedzą indywidualnie bądź w grupach, co podnosi efektywność funkcjonowania organizacji. Samo kreowanie wiedzy, dzielenie się nią, jej przechwytywanie, dokumentowanie czy też wykorzystywanie w ramach funkcjonujących w danym podmiocie zasobów zwiększa wykorzystanie jego potencjału. Utrzymanie równowagi wiedzy wśród pracowników przedsiębiorstwa wymaga różnorodnych narzędzi i procesów wspomaganych właściwą infrastrukturą. Powinny one stanowić skuteczną bazę do identyfikacji i zarządzania obszarami luk wiedzy organizacyjnej, a poprzez procesy identyfikacji, pozyskiwania, przechowywania wiedzy winny generować procesy edukacyjne dla pracowników oraz procesy dzielenia się wiedzą (*Knowledge Sharing* – KS)<sup>35</sup>.

Z kolei Tavcar i inni<sup>36</sup> mówią o strategicznym znaczeniu KM dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Systematyczne identyfikowanie, gromadzenie, analizowanie i interpretowanie doświadczeń pracowników, zapewniające bezpieczeństwo przechowywanej wiedzy w celu jej późniejszego transferu zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz organizacji, zdaniem autorów zapobiega pojawianiu się problemów technicznych, generowaniu niepotrzebnych kosztów oraz podejmowaniu zbędnych działań ECO. Oprócz wymienionych zalet wykorzystania zarządzania wiedzą w organizacji wymienić jeszcze można:

- poprawę szybkości i jakości procesów decyzyjnych wewnątrz organizacji,
- promowanie właściwych wzorców zachowań oraz dobrych praktyk wśród pracowników,
- redukcję efektu utraty doświadczonych pracowników,
- skrócenie czasu związanego z PD,

35 S. Santhosé, L. Lawrence, *Understanding the Implementations and Limitations in Knowledge Management and Knowledge Sharing Using a Systematic Literature Review*, „Current Psychology” 2023, vol. 42(2), s. 2.

36 J. Tavcar, I. Demsar, M. Varl, *Knowledge Management Support of Engineering Change Management and Adaptive Design in Serial and One-Of-A-Kind Production*, [w:] T. Graham (red.), *Knowledge Management: Progress, Trends and Challenges*, Nova Science Publishers, Inc., New York 2019, s. 32.

- uczenie się na błędach i wyciąganie wniosków poprzez ciągłe doskonalenie procesów,
- skrócenie czasu identyfikacji błędów i przyspieszenie wdrażania zmian inżynierskich (ECO) z tym związanych.

Z kolei Heisig<sup>37</sup> uważa, że systematyczne gromadzenie wiedzy na poziomie operacyjnym jest w zasadzie kluczowym elementem KM. Co prawda, samo utrzymywanie wiedzy nie jest niczym nowym w organizacji, wyzwaniem staje się dopiero jej uporządkowanie i zwiększenie udziału systematycznego posługiwania się nią w praktyce organizacyjnej, która jako nadrzędny cel ma osiągnięcie lepszych wyników.

Z badań Heisiga porównujących 160 struktur KM<sup>38</sup> na świecie wyodrębniono cztery podstawowe kategorie, które według niego są krytyczne z punktu widzenia zarządzania wiedzą. Zaliczono do nich czynniki:

- ukierunkowane na człowieka, a także związane z:
  - kulturą (organizacyjną, dotyczącą wiedzy i dzielenia się nią, uczenia się, systemem i normami wartości),
  - kapitałem społecznym (ludźmi, pracownikami, umiejętnościami pracowniczymi, ich doświadczeniem, motywacją, kwalifikacjami itp.),
  - przywództwem (przywództwo wiedzy, przywództwo i wsparcie, wsparcie najwyższego kierownictwa oraz średniego szczebla, zarządzanie zorientowane na wiedzę);
- organizacyjne związane z:
  - procesami (procesy organizacyjne i biznesowe wraz z ich organizacją),
  - strukturami (struktury organizacyjne, projekt organizacji oraz jej infrastruktura);
- technologiczne związane z:
  - technologią (informatyczną i komunikacyjną wraz z jej infrastrukturą),
  - aplikacjami i narzędziami (systemy technologiczne i technologie zarządzania wiedzą);
- zarządcze związane z:
  - strategią (wizja, misja, strategia długoterminowa, oparta na wiedzy, polityka i planowanie, długoterminowa wizja ze średnio- i krótkookresowymi strategiami),
  - celami (cele organizacyjne, skupienie się na celach i ich pomiar),
  - pomiarem (kontroling wiedzy, kryteria pomiaru, pomiar wydajności KM, wskaźniki pomiaru)<sup>39</sup>.

37 P. Heisig, *Harmonisation of Knowledge Management – Comparing 160 KM Frameworks Around the Globe*, „Journal of Knowledge Management” 2009, vol. 13(4), s. 5.

38 Heisig i Orth poprzez struktury KM rozumieją kluczowe elementy i wymiary zarządzania wiedzą, które są wykorzystywane w praktyce i badaniach w celu analizowania i strukturalizowania rozwiązań związanych z KM, zob. P. Heisig, R. Orth, *Knowledge Management Frameworks. An International Comparative Study*, Berlin 2007, s. III.

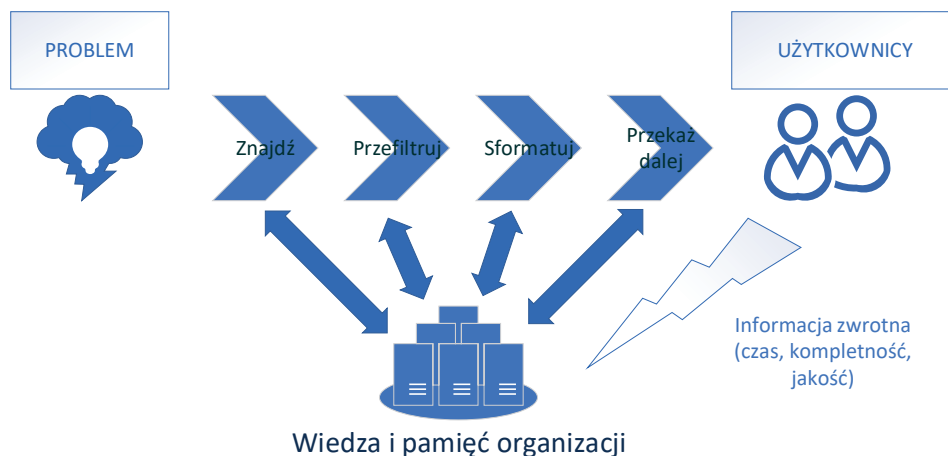
39 P. Heisig, *Harmonisation of Knowledge Management...*, s. 1.

Kwestie systemów zarządzania wiedzą (*Knowledge Management Systems – KMS*) coraz częściej przedstawiane są w kontekście rozwiązań odnoszących się do sztucznej inteligencji. Wskazują, w jaki sposób i w jakim stopniu AI może pomóc organizacjom w ich wysiłkach związanych z efektywnym zarządzaniem wiedzą. Pai i inni<sup>40</sup> na podstawie badań bibliometrycznych zaproponowali system ciągłego doskonalenia pozyskiwania wiedzy oparty na bazie 5F (*Find, Filter, Format, Forward, Feedback*) (rysunek 4).

Zdaniem wspomnianych autorów przekształcanie danych w wiedzę wymaga znacznie więcej niż przeszukiwanie baz danych w kontekście fraz czy słów, a proponowana przez nich czteroetapowa procedura może stanowić swoistą alternatywę rozwiązującą zadany problem.

Pierwszy z omawianych elementów *Find* – „szukaj” dotyczy identyfikacji i dostarczenia właściwego zasobu danych w odpowiednim czasie, bazującego na źródłach i zapisach. Należy w tym miejscu zauważyć, że kwestia przeszukiwania może zostać poszerzona o dodatkowe zapytanie, które pozwala zorganizować pliki i źródła w konkretne kategorie.

Drugi etap, czyli faza filtrowania (*Filter*), polega na odseparowaniu różnorodnych źródeł i dokumentów w celu uzyskania konkretnego zapytania, adekwatnego do wiedzy, którą chce się pozyskać. Stosuje się tutaj ocenianie, kategoryzowanie, a więc bardziej rygorystyczne metody testów przydatności całych dokumentów.



**Rysunek 4.** Ciągłe doskonalenie w cyklu wiedzy

**Źródło:** R. Pai, A. Shetty, A.D. Shetty, R. Bhandary, J. Shetty, S. Nayak, T. Dinesh, K. D'souza, *Integrating Artificial Intelligence for Knowledge Management Systems – Synergy among People and Technology: A Systematic Review of The Evidence*, „Economic Research – Ekonomska Istraživanja” 2022, vol. 35(1), s. 7056.

40 R. Pai, A. Shetty, A.D. Shetty, R. Bhandary, J. Shetty, S. Nayak, T. Dinesh, K. D'souza, *Integrating Artificial Intelligence for Knowledge Management Systems – Synergy among People and Technology: A Systematic Review of The Evidence*, „Economic Research – Ekonomska Istraživanja” 2022, vol. 35(1), s. 7055–7056.

Kolejny z etapów – formatowanie (*Format*) – ma za zadanie przekształcić prze-filtrowane dane w taki sposób, aby były one właściwe dla skutecznej komunikacji. Oczyszczanie danych, ich standaryzowanie, prezentowanie wyników w postaci arkuszy kalkulacyjnych, grafik, wykresów czy też podsumowań przy użyciu np. multimedialnych powinno z pewnością to ułatwić.

Czwarty z etapów – przekazanie (*Forward*) – wiąże się z przemieszczeniem sformatowanych wyników w formie zakodowanej lub nie do pojedynczych osób albo całych grup w taki sposób, aby mogły być one efektywnie wykorzystane. Ważnym elementem tego etapu jest podjęcie decyzji co do tego, kto powinien mieć dostęp do konkretnej wiedzy. W celu powiadomienia wybranych osób wykorzystuje się tutaj e-mail, osobiste bazy danych, załączniki itp.

Ostatni z etapów wiąże się ze sprzężeniem zwrotnym (*Feedback*), a więc z uzyskaniem odpowiedzi od ostatecznych klientów w kwestii tego, czy zbiór źródeł informacji i wymagań był właściwy. Ocenia się w nim wyniki poprzednich czterech faz w okolicznościach rynkowych za pomocą mierników wydajności. Koryguje on w pewien sposób wiedzę organizacyjną, identyfikując wąskie gardła całego procesu cyklu wiedzy i dając podstawy do podjęcia działań naprawczych i zapobiegawczych.

Trudność z pozyskiwaniem właściwej wiedzy przez pracowników sprawiła, że spora liczba organizacji wdrożyła w swoich systemach AI, łącząc je z centralnym repozytorium gromadzenia wiedzy (*Common Data Environments* – CDE), a w konsekwencji pomagając w ten sposób pracownikom w łatwiejszym odnajdywaniu dokumentów poprzez unikalne identyfikatory lub słowa odniesienia<sup>41</sup>.

Kwestia zarządzania wiedzą niepodważalnie staje się immanentnym elementem procesów PD. Problem pozyskiwania wiedzy, jej gromadzenia i przekazywania już w tych aspektach wydaje się wielce skomplikowany. Jeśli dodać do tego elementy mające wpływ na KM, np. kwestie motywacji pracowniczej, kultury organizacyjnej, technologii informatycznych, przepisów prawnych, to nietrudno się domyślić, że tematyka zarządzania wiedzą stanowi ważny dorobek w dyscyplinie nauk o zarządzaniu i jakości.

W kontekście analiz literaturowych związanych z pojęciem DfX pojawia się także kwestia inżynierii współbieżnej<sup>42</sup>. Jak podkreślają autorzy opracowania *The Engineer of 2020: Vision of Engineering In the New Century*<sup>43</sup>, sama inżynieria jako głęboko twórczy proces jest działaniem w warunkach ograniczeń technicznych, ekonomicznych, biznesowych, społecznych, politycznych, a także etycznych i innych. Efekt końcowy takich działań stanowi udany projekt materiału, komponentu, urządzenia, podsystemu, systemu, który w sposób bezpośredni lub pośredni poprawia jakość życia jego odbiorców.

41 Tamże, s. 7061.

42 G.Q. Huang (red.), *Design for X. Concurrent Engineering Imperatives*, Dordrecht 1996.

43 National Academy of Engineering US, *The engineer of 2020: Visions of Engineering in The New Century*, Washington 2004, s. 7.

W 1990 roku Amerykanie zaczęli zauważać spadek produktywności ich przemysłu w ostatnich dwóch dziesięcioleciach przy jednoczesnym, systematycznym i stopniowym poszerzaniu się dominacji krajów azjatyckich, w tym przede wszystkim Japonii. W ramach przeprowadzonych wówczas badań zwrócono uwagę, że jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest niedoskonałość stosowanej metodologii rozwoju produktu. Zwrócono wtedy uwagę, że taka metodologia powinna uwzględniać redukcję kosztów i czasu związanego z pracą nad rozwojem produktu bez negatywnego wpływu na późniejszą jego specyfikację. Jak się okazało, właśnie CE była podejściem realizującym wyżej wymienione założenia i to w niej przemysł amerykański szukał rozwiązania swoich problemów<sup>44</sup>.

Amerykanie zwrócili uwagę, że w stosunku do firm japońskich ich przedsiębiorstwa różnią się w trzech zasadniczych obszarach. Przemysł japoński bowiem ma:

- zdecydowanie krótszy czas wejścia produktu na rynek (mierzony od koncepcji do dostarczenia gotowego produktu),
- mniejszą liczbę zwrotów reklamacyjnych tych produktów (*Engineering Change of Order* – ECO) – dokumentujące niedoskonałości procesu projektowania wyrobów poprzez zmiany specyfikacji lub konstrukcji w konkretnych fazach projektowania lub wprowadzania produktu na rynek,
- lewostronny rozkład częstotliwości ECO, podczas gdy dla produktów z rynku USA jest on prawostronny skośny, co pokazuje, że większość zmian w produktach realizuje się u Azjatów jeszcze w fazie koncepcyjno-projektowej, a w przypadku Amerykanów poprawki realizowane są w produktach gotowych – jest to kwestia zapobiegania (prewencji) lub korygowania; współpraca zespołu wielodyscyplinarnego i wczesne prototypowanie generują znacznie mniejsze koszty aniżeli identyfikowanie i korygowanie problemów w późnym cyklu życia produktów<sup>45</sup>.

Jak zaprezentowali Menon i Graham<sup>46</sup>, CE to inżynierskie podejście do zarządzania wszystkimi aspektami działalności związanej z projektowaniem i rozwojem produktów poprzez integrację tych procesów w celu skracania czasu działań projektowych, zmniejszania zaangażowania kapitału (mniejsze koszty) oraz ograniczania liczby potencjalnych późniejszych poprawek produktu. Zdaniem tych autorów CE posiada różne synonimy, do których zaliczyć można: zintegrowany rozwój produktu (*Integrated Product Development* – IPD), inżynierię symultaniczną (*Simultaneous Engineering* – SE), inżynierię cyklu życia produktu (*Life Cycle Engineering* – LCE), inżynierię równoległą (*Parallel Engineering* – PE) oraz inżynierię zespołową (*Team Engineering* – TE).

44 S. Dwivedi, M. Sobolewski, *Concurrent Engineering – An Introduction*, CERC Technical Reports Series, Technical Memoranda, CERC-TR-TM-90-006, West Virginia 1990.

45 U. Menon, M. Graham, *Concurrent Engineering: Effective Deployments Strategies*, „BeloHorizonte” 1996, vol. 6(2), s. 168.

46 Tamże, s. 166.



Przygotowany w 1988 roku przez Winnera i innych raport Instytutu Analiz Obronności USA (*Institute for Defense Analysis* – IDA)<sup>47</sup> stwierdza, że CE jest systematycznym podejściem do zintegrowanego i współbieżnego procesu projektowania wyrobów wraz z procesami współistniejącymi (wytwarzaniem i wsparciem). Integruje ona zatem wokół procesu projektowania produktu procesy produkcyjne i pomocnicze, wykorzystując do tego celu wielowymiarową wiedzę z zakresu zarządzania, inżynierii i biznesu. Celem tego podejścia jest wzięcie pod uwagę przez projektantów<sup>48</sup> wszystkich aspektów produktu (jakość, czas, koszt, wymagania użytkownika), ale także faz, poczynając od koncepcji, na procesie nabycia produktu przez klienta kończąc. Warto w tym miejscu zauważyć, że autorzy raportu pominęli zupełnie proces odbioru z rynku zużytego towaru, co w tamtym okresie było kompletnie zmarginalizowane. CE wykorzystuje do tego celu różnorodne metody, techniki i narzędzia opierające się na trzech ogólnych założeniach bazowych:

- bazowanie w procesach projektowania na wielodyscyplinarnym zespole integrującym procesy projektowania produktu z późniejszymi procesami jego wytwarzania (podstawowymi) i wsparcia (pomocniczymi),
- użycie komputerowego wspomagania (*Computer Aided* – CAX) w różnych jego kontekstach, np. projektowym (*Computer Aided Design* – CAD), wytwórczym (*Computer Aided Manufacturing* – CAM), inżynierskim (*Computer Aided Engineering* – CAE) i innych w celu wspomagania integracji procesów projektowych poprzez współkorzystanie z rozwiązań produktów, procesów, modeli, baz danych itp. już istniejących i dzielenie się nimi,
- użycie różnorodnych, analitycznych metod optymalizacji procesu projektowania produktu oraz jego wytwarzania wraz z procesami pomocniczymi.

Sam proces CE leży w pewnej opozycji do dotychczas wykorzystywanych w procesach PD inżynierii sekwencyjnej (*Sequence Engineering* – SqE). Jak opisuje to Sawhney<sup>49</sup>, sekwencyjny (szeregowy, zwany także metodą *Across-The-Wall* – AW – „przez ścianę”) tryb realizacji zadań polega na realizacji kolejnych etapów projektowania wyrobu (projektowanie, planowanie, wytwarzanie, marketing i usługi) w taki sposób, że zamknięcie jednego etapu pozwala przejść do kolejnego. W pierwszej fazie następuje przepływ informacji, który jest przeciwny do przepływu materiałów. Oznacza to, że dział badań rynkowych w typowo funkcjonalny sposób (bez udziału innych działów) ustala potrzeby klienta, przekazując przez przysłowiową ścianę swoje prognozy sprzedaży do działów wytwarzania i planowania, które z kolei w podobny sposób ustalają specyfikację techniczną produktu, przekazując ją do działu PD. Dział projektowy, otrzymawszy wytyczne (specyfikację), projektuje produkt, a jego

47 R. Winner, J. Pennell, H. Bertrand, M. Slusarczyk, *The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition*, IDA Raport R-338, Virginia, USA 1988, s. 5–6.

48 Przez słowo projektanci rozumie się osoby projektujące nowe produkty (*Designer*), a także rozwijające produkty już istniejące (*Developer*).

49 G. Sawhney, *Concurrent Engineering*, New Delhi 2018, s. 8–9.

prototyp, tworzony w praktycznie całkowitej izolacji od procesów produkcyjnych, czyli „przez ścianę”, przekazywany jest do działu wytwarzania. Ten organizuje proces produkcyjny, najczęściej na masową skalę. Taki schemat rozwoju produktu rzadko pozwala osiągnąć sukces po pierwszej iteracji, dostarczając na rynek produkt, który zostanie od razu pozytywnie przyjęty przez klientów. Wynika to z faktu, że to dopiero oni weryfikują dany towar pod kątem jego jakości, funkcjonalności, niezawodności, użyteczności itp., przekazując poprzez np. procesy reklamacyjne informację do producenta o zauważonych niedostatkach produktu. Ponadto w ramach procesu produkcyjnego wychodzi szereg problemów wynikających z podejścia do realizacji procesów AW (rysunek 5).

Brak uwzględnienia np. ograniczeń procesu wytwórczego związanych z technologią, kadrami, wiedzą itd. uniemożliwia osiągnięcie właściwych korzyści z wprowadzonego na rynek produktu. Informacja zwrotna na jego temat występuje w formie usterek, błędów, zmian i poprawek, które stanowią swoiste działania korygujące. Seryjna powtarzalność tego procesu pozwala nazywać go inżynierią seryjną (*Serial Engineering* – SrE). Wspomniane problemy mogą dotyczyć:

- niedopasowania zaprojektowanego produktu do procesów produkcyjnych,
- niedostosowania parku maszynowego do zaprojektowanego produktu,
- zwiększenia wykonywanej w procesie produkcyjnym pracy oraz ilości odpadów, co wynika ze ścisłego ograniczenia procesu projektowania produktu,
- utrudnionego montażu części,
- braku możliwości wykorzystania dotychczasowych linii wraz z ich osprzętem do zaprojektowanego produktu.

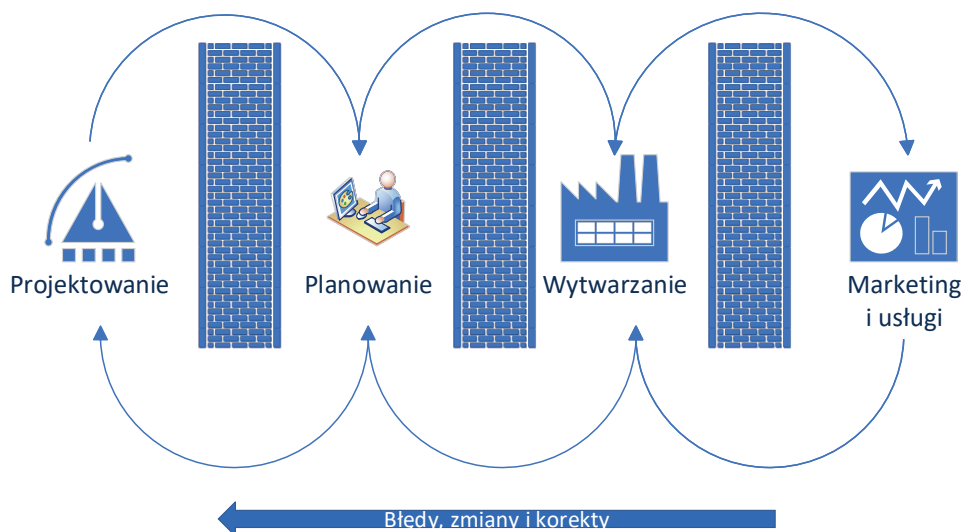
Zaprezentowane problemy składają się zatem na wady koncepcji SqE, które można przedstawić w następujący sposób:

- realizacja zadań w sposób szeregowy (krok za krokiem) utrudnia kompleksową kontrolę procesu PD,
- proces ten jest niedopasowany do szybkich zmian na konkurencyjnych rynkach i nie pozwala rozwijać produktu w krótkim czasie, aby osiągnąć zyski z zaspokajania potrzeb klientów,
- prowadzi on do wielu pomyłek i strat dla przedsiębiorstwa wynikających z braku komunikacji i wymiany wiedzy pomiędzy komórkami organizacyjnymi zaangażowanymi w proces PD<sup>50</sup>.

Jak widać, kompromisowa, bazująca na komunikacji, uwzględniająca szereg różnorodnych czynników, horyzontalna względem komórek organizacyjnych, integrująca działania kapitału społecznego metoda CE wykazuje szereg zalet, pozwalając tworzyć wymierną wartość dla ostatecznych nabywców, unikając jednocześnie kosztownych poprawek.

<sup>50</sup> Tamże, s. 9.





**Rysunek 5.** Metoda inżynierii sekwencyjnej (*Across-The-Wall*)

**Źródło:** G. Sawhney, *Concurrent Engineering*, New Delhi 2018, s. 8.

Duhovnik i inni<sup>51</sup> zaproponowali siedem podstawowych etapów realizacji procesu CE, zaliczając do nich:

- 1) ustanowienie celów dla projektowanego produktu,
- 2) opracowanie koncepcji,
- 3) prototypowanie (konstrukcyjne przygotowanie produkcji),
- 4) planowanie procesu (technologiczno-produkcyjne przygotowanie produkcji),
- 5) przygotowanie produkcji (organizacyjne przygotowanie produkcji<sup>52</sup>),
- 6) wytwarzanie i montaż,
- 7) dostawę.

Autorzy zwrócili uwagę, że istota różnicy pomiędzy projektowaniem SE i CE polega na przepływie informacji pomiędzy poszczególnymi fazami. W przypadku SE komplet informacji w ramach zasady krok-za-krokiem przekazuje się w formie gotowego opracowania (raportu) po zakończeniu danej fazy procesu PD. Wspomniane opracowanie nie jest jednak konsultowane z innymi komórkami odpowiedzialnymi za kolejne kroki procesu PD.

W przypadku CE proces przygotowania opracowania ma charakter koncyliacyjny, a jego istota opiera się na znalezieniu właściwego optimum pomiędzy wymaganiami klienta, uwarunkowaniami funkcjonowania organizacji oraz jej oczekiwaniami. Możliwość współpracy działów powinna bazować na kulturze swobodnego

51 J. Duhovnik, M. Sterbek, B. Prasad, *Development of New Products in Small Company*, „Concurrent Engineering Research and Application” 2001, vol. 9(3), s. 5.

52 I. Durlik, *Inżynieria zarządzania*, Katowice 1993, s. 62.

wypowiadania poglądów oraz szeroko rozumianym obiektywizmem. Ważne, aby także uwzględniała „empatię” organizacyjną, a więc właściwe wartościowanie priorytetów poprzez próbę zrozumienia argumentów drugiej strony.

Współczesne projektowanie nie byłoby tak skuteczne, gdyby nie technologie informatyczne (*Information Technology* – IT). Rozwijały się one niejako dwubiegunowo (systemy komputerowego wspomagania oraz systemy zarządzania danymi produktem), aby osiągnąć swoją integrację na przełomie XX i XXI wieku.

Jak opisują Ameri i Dutta<sup>53</sup>, pojawienie się systemów komputerowego wspomagania projektowania (CAD) we wczesnych latach osiemdziesiątych XX wieku spowodowało w procesach projektowania inżynierskiego niewątpliwą rewolucję. Geometryczne modele tworzone w ramach systemów CAD nie tylko w łatwiejszy sposób mogły być projektowane, ale również obracane lub odmiennie manipulowane przez projektantów według ich potrzeb. Dodatkową wartość stanowił fakt ponownego użycia zaprojektowanych wyrobów, a co za tym idzie – systemy CAD dostarczyły lepszych użyteczności i funkcji niż poprzednie systemy projektowania. Systemy komputerowego wspomagania projektowania wyeliminowały zatem mozolne prace projektantów odbywające się na deskach kreślarskich, dając jednocześnie perspektywę włączania do systemów CAD dodatkowych rozwiązań informatycznych.

W kolejnym etapie komputerowego wspomagania systemy CAD zostały wzbogacane o systemy wspomagające wytwarzanie (*Computer Aided Manufacturing* – CAM) lub inżynierię (*Computer Aided Engineering* – CAE), co stworzyło podstawy do podjęcia prób ich integracji.

Durlik<sup>54</sup> w ramach systemów typu CAX wyróżnił:

- komputerowo wspomagana inżynierię (CAE) obejmującą procesy projektowania i rozwoju, w skład której wchodzi:
  - komputerowo wspomagane projektowanie (CAD), czyli techniczne przygotowanie produkcji (konstrukcja, technologia, wykaz podzespołów i części, rysunki techniczne, organizacja całego działu),
  - komputerowe wspomaganie planowania (CAP) związane z planowaniem pracy w kontekście wytwarzania części, montażu, pomiarów, pakowania i wysyłki),
- komputerowo wspomagane wytwarzanie (CAM), którego głównym celem jest programowanie obrabiarek sterowanych numerycznie poprzez sterowanie i kontrolowanie pracy urządzeń, właściwe wytwarzanie, nadzór i kontrola danych eksploatacyjnych,
- komputerowo wspomagana jakość (CAQ) wiążącą się głównie z zapewnieniem jakości poprzez planowanie kontroli, sterowanie nią, jej realizację oraz zarządzanie środkami kontroli.

53 F. Ameri, D. Dutta, *Product Lifecycle Management: Closing...*, s. 578–579.

54 I. Durlik, *Inżynieria zarządzania...*, s. 142.

Połączone ze sobą systemy CAE, CAM oraz CAP tworzą zintegrowane systemy wytwarzania CIM pozwalające wykorzystywać technologie IT do zarządzania procesami produkcyjnymi.

Sam proces projektowania inżynierskiego może być opisywany jako iteracyjny proces optymalizacji. Wykorzystywanie rozwiniętych systemów CAD w ramach CAE umożliwia wspomaganie złożonego procesu projektowania inżynierskiego (rozumianego często jako iteracja projektowania i walidacji) w taki sposób, aby projektowany model mógł być parametryzowany, a jego walidacja mogła być symulowana obliczeniowo<sup>55</sup>.

Proces CAE wspomaga komputerowo prace badawczo-rozwojowe, w tym przede wszystkim analizy, obliczenia i symulacje. Dzieli się on na trzy główne etapy: przetwarzanie wstępne, analizę kalkulacyjną i proces właściwy. Pierwszy z nich tworzy zręby geometryczne projektu, określa warunki początkowe oraz warunki brzegowe, a jego efektem jest model numeryczny będący podstawą prac kolejnego etapu. Analiza obliczeniowa dotyczy szeregu działań związanych np. z rozwiązywaniem dużej liczby równań o zróżnicowanej skali trudności. Ta część procesu okazuje się kluczowa z punktu widzenia projektowanych wyrobów, realizowana jest tutaj największa liczba obliczeń mających wpływ na ostateczną postać wyrobu. W fazie procesu właściwego przeanalizowane i obliczone wyniki są prezentowane w postaci graficznej, ukazując jeden z ostatecznych wariantów projektowanego modelu<sup>56</sup>.

Na ostateczny kształt i rozwój systemów CAE wpływ mają trzy podstawowe grupy uczestników:

- pracownicy uczelni wyższych i jednostek badawczych (tworzący przede wszystkim naukowe zręby wykorzystywanych w systemach CAE algorytmów, ustalanych warunków brzegowych czy też opisywania i doskonalenia interakcji na linii człowiek–komputer),
- organizacje tworzące oprogramowanie systemów CAE (z głównym nastawieniem na tworzenie aplikacji komputerowych oraz ich późniejszą integrację z dodatkowymi systemami wspierającymi CAE bądź będącymi odbiorcami informacji z CAE; tworzenie aplikacji opiera się na wiedzy dostarczonej przez pierwszą grupę uczestników, ale także ta grupa kreuje nowe koncepcje i rozwiązania),
- użytkownicy systemów CAE (użytkownicy powstałych systemów, na ogół przedsiębiorstwa, którzy weryfikują i walidują otrzymane narzędzia, zgłaszając często pomysły ich usprawnień, formalnie ostateczni beneficjenci).

55 Y. Liu, S. He, W. Liu, X. Chen, *A Design Optimization Method with Sparse Scattered Data and Evolutionary Computation*, Hindawi, „Journal of Nanomaterials” 2022, vol. 2022, s. 1–3.

56 Y. Li, Z. Guan, *Development and Prospect of Computer Aided Engineering*, Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference of Information and Communication Technology (ICTech), Wuhan, China 2022, s. 61–65.

Zaprezentowane etapy działania systemów CAE oraz zdefiniowani uczestnicy pozwalają zauważyć, że CAE bazuje na trzech fundamentalnych filarach: rozwoju algorytmów, tworzeniu aplikacji i integracji oprogramowania oraz zastosowania inżynierskiego<sup>57</sup>.

Kolejnym elementem komputerowego wspomagania, zasługującym na krótką charakterystykę, jest system komputerowego wspomagania jakości. Już w 1979 roku Wolfe i Tasse<sup>58</sup>, bazując na doświadczeniach oddziału firmy Motorola, zajmującego się produkcją półprzewodników, zwrócili uwagę, że identyfikacja problemów jakościowych we wczesnej fazie procesu produkcyjnego pozwala zaoszczędzić przedsiębiorstwu tysiące dolarów. Wspomniana firma miała wtedy informatyczny system zarządzania zapewnieniem jakości, któremu przyświecały cztery podstawowe cele:

- poprawa zdolności przewidywania i wczesnego wykrywania problemów jakościowych w wytwarzanych produktach,
- dostęp do metod i narzędzi monitorowania jakości produktów oraz zasobów umożliwiających zmianę planów kontroli tych działań,
- swobodny i łatwy dostęp do baz danych wraz z możliwością ich analizy,
- dostęp do globalnego wsparcia funkcji zapewnienia jakości w ramach koncernu Motorola.

W literaturze przedmiotu można znaleźć także rozwiązania integrujące systemy CAD-CAQ<sup>59</sup>, które oznaczają powiązanie przepływów technicznych pomiędzy sferą projektowania a sferą zapewnienia jakości (rysunek 6).

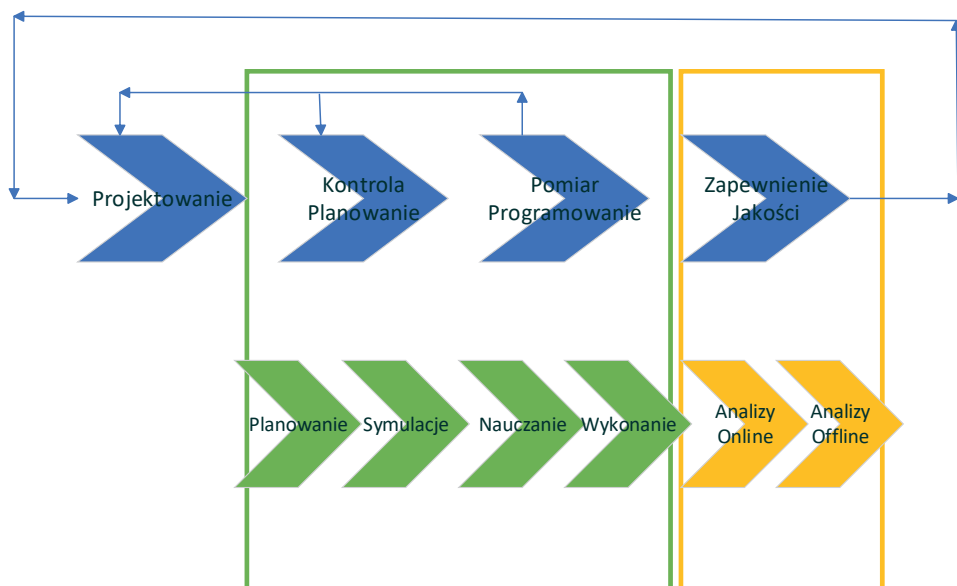
Autorzy prezentowanego rysunku (rysunek 6) wyróżnili w ramach procesów CAQ działania związane z planowaniem działań kontrolnych, planem pomiaru jakości i jej zapewnieniem, zmierzające ostatecznie do uzyskania produktu spełniającego oczekiwania klientów. W ramach działań dotyczących planowania działań kontrolnych można wskazać: kryteria jakości (np. tolerancji wykonania), metody kontroli, poziom jakości czy też metody weryfikacji. Z kolei w ramach działań odnoszących się do planów pomiaru jakości zdefiniowano: elementy pomiaru, uwarunkowania pomiaru (wymagania pozwalające skoordynować proces pomiaru maszyn, urządzeń oraz czujników uczestniczących w tym procesie) oraz urządzeń go zabezpieczających. Ostatnim etapem jest program kontroli, który ma za zadanie wyznaczyć: zakres badań, wielkość prób, mierniki, wskaźniki itp. Program kontroli może przybierać formułę zarówno *on-line*, jak i *off-line*<sup>60</sup>.

57 Tamże, s. 1–2.

58 P. Wolfe, S. Tasse, *Development of a Quality Assurance Management Information System*, „International Journal of Production Research” 1979, vol. 17, s. 169.

59 S. Mbang, S. Haasis, *Automation of the Computer-Aided Design-Computer-Aided Quality Assurance Process Chain in Car Body Engineering*, „International Journal of Production Research” 2004, vol. 42, No. 17, s. 3676–3677.

60 Tamże.



**Rysunek 6.** Kolejne etapy zintegrowanego łańcucha procesu CAD-CAQ na przykładzie elementów blacharskich w przemyśle samochodowym

**Źródło:** S. Mbang, S. Haasis, *Automation of the Computer-Aided Design-Computer-Aided Quality Assurance Process Chain in Car Body Engineering*, „International Journal of Production Research” 2004, vol. 42, No. 17, s. 3676.

Działania związane z komputerowym wspomaganie projektowania oraz komputerowym wspomaganie jakości wymagają szerokiej bazy wiedzy, łączącej się z ograniczeniami nie tylko w działaniach konstrukcyjnych, ale także i wytwórczych. Bardzo często bowiem sam proces technologiczny, niedoskonały i zmienny, wymaga już uwzględnienia na etapie projektowania produktów wraz z ich jakością. Integracja wszystkich tych elementów stanowi dla wielu przedsiębiorstw bardzo poważne wyzwanie.

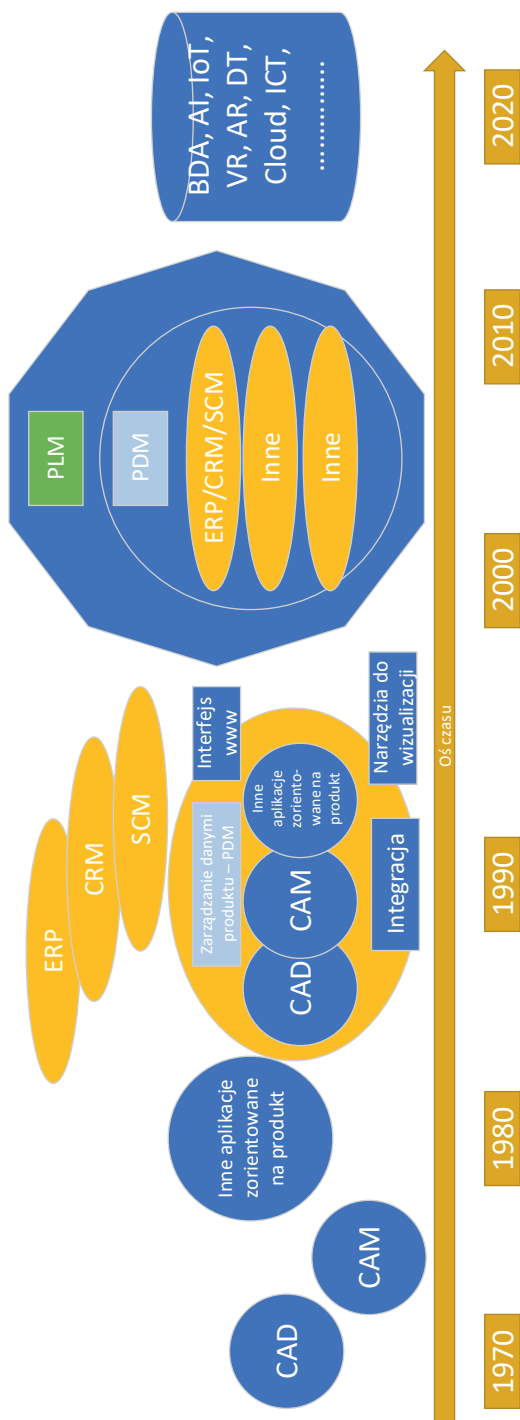
Dalsze etapy integracji systemów komputerowego wspomaganie wiążą się z rozwojem technologii IT i to zarówno w wymiarze infrastrukturalnym, jak i systemowo-aplikacyjnym. W latach dziewięćdziesiątych pojawiła się pierwsza grupa zintegrowanych programów dla przedsiębiorstw. Pierwsze z nich to systemy ERP (*Enterprise Resource Planning*), będące naturalną kontynuacją systemów MRP (*Material Requirement Planning*) i MRP II (*Manufacturing Resource Planning*). Systemy MRP pozwalały na podstawie zestawienia materiałowego BoM (*Bill of Materials*) planować konkretne zakupy i dostawy materiałów oraz części według przygotowanych wcześniej prognoz. Systemy MRP II dołożyły do funkcjonalności systemów MRP pętlę bilansowania faktycznych potrzeb już nie tylko z prognozą sprzedaży, ale także z faktycznie wytworzonymi produktami, korygując potrzeby netto o te właśnie wartości. Z kolei systemy ERP wzbogaciły systemy MRP II o moduły związane z kosztami, kadrami, jakością i innymi modułami odpowiedzialnymi za odmienne funkcjonalne obszary organizacji.

Inne systemy, które uzupełniły CIM, to systemy zarządzania relacjami z klientami (*Customer Relationship Management* – CRM). Ich podstawowym założeniem jest pozyskanie, budowanie, utrzymywanie i doskonalenie relacji z klientami. W latach dziewięćdziesiątych zwrócono także uwagę na kwestię zarządzania łańcuchem dostaw (*Supply Chain Management* – SCM) jako nieco szersze zrozumienie logistyki i procesów ją kształtujących.

Równolegle do rozwoju systemów CAD pojawiły się systemy zarządzania danymi produktu (*Product Data Management* – PDM). Ich nadrzędnym celem było zarządzanie informacjami o produkcie tworzonymi w różnych miejscach i przez odmienne narzędzia w celu gromadzenia informacji i wiedzy o produkcie. Potrzeba łatwego, szybkiego i bezpiecznego dostępu do ważnych danych podczas procesu projektowania produktu stała się głównym imperatywem popularności PDM. Wczesne systemy PDM miały więc za zadanie dostarczać użytkownikom wymaganych danych poprzez centralne repozytorium danych (CDE). Innym ważnym elementem było zapewnienie integralności danych o produkcie bazujące na zbudowaniu systemu ich tworzenia i modyfikowania wraz z jego kontrolą i aktualizacją.

Cao i Folan zestawili osiągnięcia rozwoju systemów komputerowego wspomagania z zarządzaniem cyklem życia produktu (rysunek 7).

W latach siedemdziesiątych dominowały działające bez konkretnej integracji komputerowe systemy wspomagania projektowania i wytwarzania. W latach osiemdziesiątych pojawiały się specjalistyczne programy wspomagające wybrane aspekty projektowania wyrobów, aby dekadę później zintegrować wybrane programy klasy CAX z zarządzaniem danymi o produkcie. W latach dziewięćdziesiątych zaczęły się pojawiać także pierwsze interfejsy, które bazowały na protokołach WEB, oraz narzędzia usprawniające wizualizację prac projektowych. Systemy klasy ERP, CRM oraz szeroko rozumiane zarządzanie łańcuchem dostaw stanowiły jednak w dalszym ciągu niezależne rozwiązania. Dopiero w okolicach roku 2000 dokonano integracji systemów informatycznych typu CAX, ERP, CRM, PDM, tworząc bazę dla zintegrowanego systemu zarządzania cyklem życia produktu wspomagane komputerowo, do którego stopniowo dołączano kolejne zdobycze technologiczne. Ogłoszenie w 2011 roku przez rząd federalny Niemiec strategii rozwoju wysokich technologii – *Industry 4.0* – otworzyło kolejną przestrzeń do wzbogacenia procesu zarządzania cyklem życia produktu, a przez to procesu jego projektowania i rozwoju, o dotychczas nieznane komponenty związane z takimi pojęciami jak: system cyber-fizyczny (*Cyber Physical System* – CPS), Internet Rzeczy – (*Internet of Things* – IoT), rozszerzona i wirtualna rzeczywistość (*Augmented Reality* – AR, *Virtual Reality* – VR), sztuczna inteligencja, zbiory danych (*Big Data* – BD) czy też chmura obliczeniowa (*Cloud Computing* – CC). Jeśli dodamy do tego nowe formy identyfikacji i komunikacji, takie jak systemy identyfikacji drogą radiową (*Radio Frequency Identification* – RFID) czy też pierwsza technologia mobilna 5G, zaprojektowana nie tylko dla ludzi, ale także dla maszyn i systemów, często działająca poza dostępem mobilnym (*5G Technologies* – 5G), to procesy PD w najbliższym czasie czekają spore zmiany.



**Rysunek 7.** Systemy komputerowego wspomagania w kontekście zarządzania cyklem życia produktu na przełomie lat

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie H. Cao, P. Folan, *Product life cycle: The Evolution of a Paradigm and Literature Review from 1950–2009*, „Production Planning and Control” 2011, vol. 23(8), s. 642.



## 1.2. Pojęcie i istota projektowania wspomagającego doskonałość

Obszar projektowania i rozwoju produktu jest zagadnieniem wielodyscyplinarnym. Oprócz omawianych już kwestii wzornictwa przemysłowego, cyklu życia produktu, zarządzania wiedzą, inżynierii współbieżnej, które wspomagane są technologiami IT, sam proces projektowania wyrobu w swojej pierwotnej i najprostszej formie powinien uwzględniać dwa podstawowe elementy, tzn. wymaganie klienta oraz cele organizacji. Spełnienie tych pierwszych wiąże się w przypadku przedsiębiorstw produkcyjnych z konkretnymi procesami, których racjonalizacja i optymalizacja w kontekście czasu, kosztu i jakości pozwala zaoferować konkurencyjny produkt.

Jak podaje Rowland, DfX jest jedną ze strategicznych koncepcji przedsiębiorstwa, która daje pewność co do tego, że produkt zostanie zaprojektowany w taki sposób, aby przedsiębiorstwo mogło zdobyć sukces rynkowy. Kluczem koncepcji jest sprawna, efektywna i horyzontalna współpraca pomiędzy konkretnymi, funkcjonalnymi działami firmy odpowiedzialnymi za projektowanie wyrobów z resztą działów, w których produkt będzie przechodził swój cykl życia<sup>61</sup>.

Z kolei Holt i Barnes łączą techniki DfX z pojęciem projektowania współbieżnego, które to w sposób holistyczny traktuje projektowanie produktów, szukając w nim bezpiecznego kompromisu dla klienta, przedsiębiorstwa oraz otoczenia. Zauważają oni, że pojedyncze techniki związane z DfX zapewniają optymalizację tylko wybranych obszarów rozwoju produktu, pomijając w ten sposób inne, równie istotne<sup>62</sup>.

Nietrudno zatem przewidzieć, że projektowanie wspomagające doskonałość jako koncepcja nie pojawiło się w sposób rewolucyjny, ale raczej stało się ewolucyjnym zbiorem rozwiązań projektowych, wspomagających różnorodne obszary funkcjonowania organizacji oraz całego cyklu życia produktu. Jednakże pierwsze kwestie, które były uwzględniane w projektowaniu produktu, wiązały się bezpośrednio z wytwarzaniem.

Podobnie do problematyki DfX podchodzi Bralla, który twierdzi, że aby zrozumieć koncepcję DfX, należy rozpocząć od omówienia koncepcji *Design for Manufacturability* (DfMfa) – rozszerzenie pojęcia DfM, które to w szerszym kontekście zawiera wszystkie metody i systemy pozwalające projektować produkty łatwiejsze do wytworzenia oraz obniżające koszty produkcyjne. W nieco węższym zakresie DfM jest techniką bazującą na wiedzy, zawierającą szereg zasad, wytycznych, rekomendacji lub praktycznych wskazówek projektowania produktu w taki sposób, aby był on łatwy do wykonania<sup>63</sup>.

61 R. Rowland, *Designing for Excellence*, „Journal of Surface Mount Technology” 1997, vol. 11(10), s. 30.

62 R. Holt, C. Barnes, *Towards an integrated approach to „Design for X”: an agenda for decision based DFX research*, „Research in Engineering Design” 2009, vol. 21(2), s. 123.

63 J. Bralla, *Design for eXcellence*, New York 2006, s. 3.

Już w 1984 roku Garvin w swoim artykule *What Does 'Product Quality' Really Mean?*<sup>64</sup> wskazał osiem podstawowych cech jakościowych produktów, które powinny zostać uwzględnione w procesie projektowania wyrobów. Zaliczył do nich:

- ogólne wykonanie i estetykę produktu (jak dobrze działają zaprojektowane w produkcji funkcje i czy jest on atrakcyjny pod kątem walorów estetycznych),
- cechy i funkcje wyrobu (jak wiele jest cech i funkcji drugorzędowych, wzbogacających działania cech i funkcji głównych),
- niezawodność i trwałość (mierzoną czasem użytkowania wyrobu i jego wytrzymałością w użytku),
- zgodność (zgodność produktu z ustalonymi dla niego specyfikacjami lub normami),
- zdolność do serwisowania (łatwość utrzymania produktu w pożądanym działaniu – czynności serwisowe, np. wymiana worka w odkurzaczu),
- postrzeganie produktu (jak wysoka, zdaniem użytkowników, jest jakość produktu oraz jego reputacja i renoma na tle innych towarów)<sup>65</sup>.

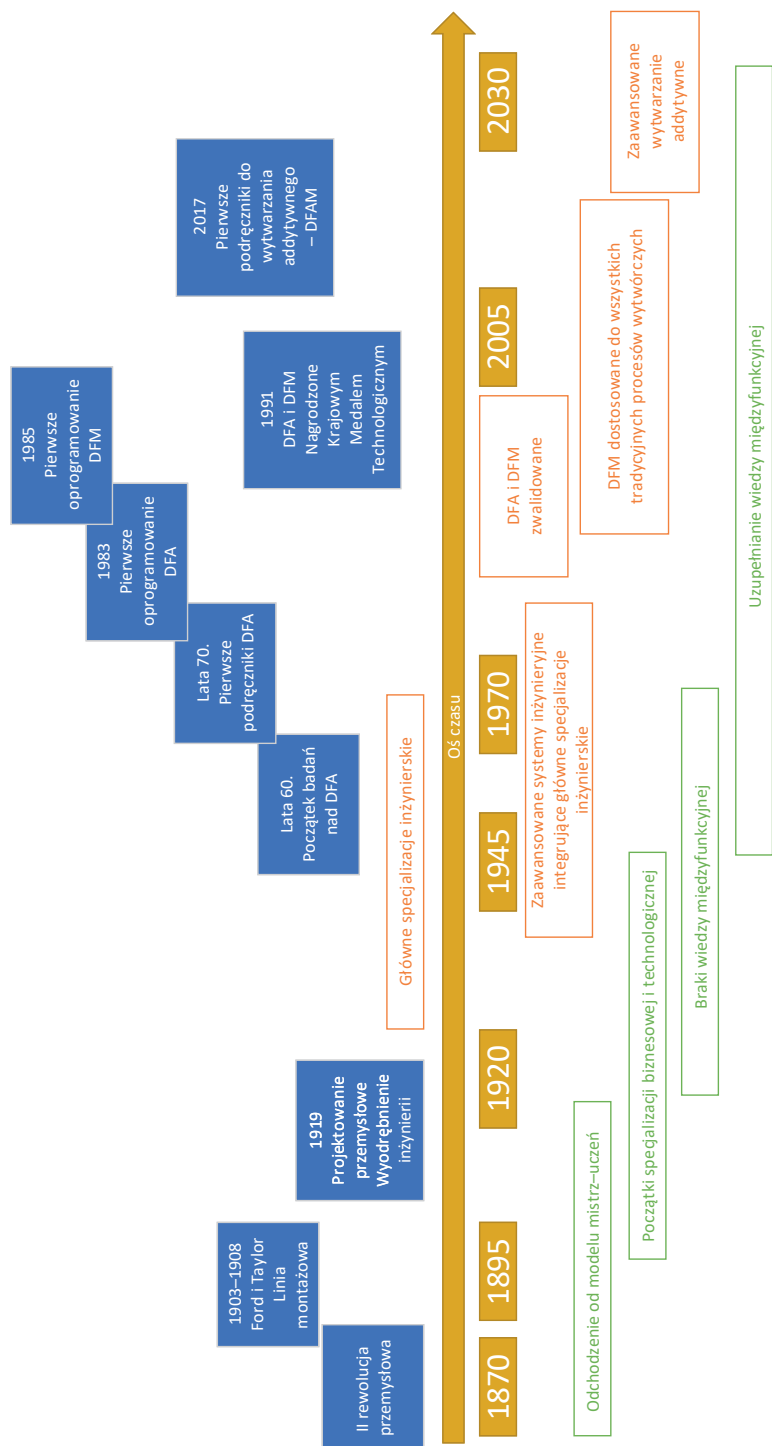
Podejmując się opisu zagadnień związanych z projektowaniem produktu, można także zwrócić uwagę, że w literaturze przedmiotu pierwszym z zagadnień, które pojawiało się oprócz wymagań klienta jako istotna wytyczna projektowania, było wytwarzanie (*Design for Manufacturing*) oraz jego naturalna kontynuacja, czyli montaż (*Design for Assembly*). Próby historycznego uszeregowania obydwu koncepcji podjął się Goldens, założyciel i prezes Goldense Group Inc.<sup>66</sup> Zdaniem wspomnianego autora koncepcja DfM zyskała uznanie przedsiębiorstw po około 90 latach od momentu pojawienia się pierwszej rewolucji przemysłowej i blisko po 50 latach od skonstruowania pierwszej linii montażowej przez Forda i Taylora, czyli w latach sześćdziesiątych XX wieku. Wtedy to powstały pierwsze przewodniki, które były używane w procesie projektowania wyrobów. Jako przykład takiego kompendium wiedzy można podać opublikowany przez General Electric podręcznik produkcyjności *Manufacturing Producibility Handbook*<sup>67</sup>, przeznaczony do wewnętrznego użytku w USA. Koncepcja DfM na dobre rozwinęła się jednak dopiero w latach osiemdziesiątych, kiedy to pojawiło się pierwsze oprogramowanie CAX wspomagające prace projektowe w kontekście wytwarzania i montażu (rysunek 8). Następnie było ono stopniowo uzupełniane.

64 D. Garvin, *What Does 'Product Quality' Really Mean?*, „Sloan Management Review” 1984, vol. 26, No. 1, s. 29–33.

65 J. Bralla, *Design for eXcellence...*, s. 18–19.

66 B. Goldens, *A History of Design for Manufacturing and Assembly*, „Machine Design” 2022, vol. 94(2), <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21213546/a-history-of-design-for-manufacturing-and-assembly> [dostęp: 5.04.2023].

67 G. Boothroyd, *Product Design for Manufacture and Assembly*, „Computer Aided Design” 1994, vol. 26, No. 7, s. 509.



**Rysunek 8.** Ewolucja projektowania wspomagającego wytwarzanie i montaż  
**Źródło:** B. Goldens, *A History of Design for Manufacturing and Assembly*, „Machine Design” 2022, vol. 94(2), <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21213546/a-history-of-design-for-manufacturing-and-assembly> [dostęp: 5.04.2023].

Na przełomie tego czasu zanikał model przekazywania wiedzy mistrz–uczeń, a zwiększające się na skutek wykorzystania masowości produkcji wolumeny wyrobów doprowadzały do rozpoczęcia specjalizowania się przedsiębiorstw w kontekstach biznesowych i technologicznych. Po pewnym czasie zaczęto zauważać pojawiające się deficyty wiedzy projektantów z innych obszarów funkcjonalnych przedsiębiorstwa. Kwestia usystematyzowania wiedzy w obszarze projektowania wspomagającego wytwarzanie jest także podejmowana w literaturze przedmiotu. Dla przykładu Bralla<sup>68</sup> zaproponował następujące wytyczne (generalne zasady projektowania wyrobów) wspomagające wytwarzanie:

- doprowadzenie projektu do najprostszej formy (minimalizacja liczby wymaganych części, ich multifunkcjonalność itp.),
- wykorzystywanie technologii ograniczających koszt (zastąpienie wiercenia np. przebijaniem prasą),
- zachowanie szczegółowości projektu na takim poziomie, aby był on zrozumiały dla jego odbiorców, np. operatorów maszyn,
- wymiarowanie projektu względem jasnych i czytelnych powierzchni oraz punktów odniesienia,
- minimalizację wagi projektowanych wyrobów przy zachowaniu sprecyzowanych w projekcie wymagań,
- przystosowanie projektu do wykorzystania narzędzi ogólnego przeznaczenia – ograniczanie stosowania narzędzi specjalnych, przeznaczonych do wąskiej grupy zastosowań,
- unikanie w projekcie ostrych krawędzi,
- projektowanie uwzględniające wykonanie możliwie największej liczby operacji na wyrobie bez zmiany jego położenia,
- projektowanie bez schodkowych linii podziału elementów odlewanych, co zmniejsza złożoność formy, wzoru oraz koszty przy zachowaniu jak najbardziej równomiernej grubości ścianek,
- rozmieszczanie otworów w projekcie uwzględniające ich jednoczesne wykonanie.

Kierując się zaprezentowanymi wytycznymi, można przytoczyć wiele przykładów produktów, które poprzez przemyślane projektowanie mogły osiągnąć sukces. W 2004 roku wszedł na rynek telefon Motorola RAZR, który stał się sukcesem firmy na rynku amerykańskim poprzez spełnienie kilku kluczowych czynników, tzn.:

- pomniejszonego rozmiaru i ograniczenia wagi,
- właściwego zaprojektowania cech użytkowych i funkcjonalności (zintegrowana kamera, duża klawiatura i wyświetlacz, gniazdo słuchawkowe, technologia Bluetooth, nowatorskie umieszczenie anteny),
- doskonałej ergonomii,

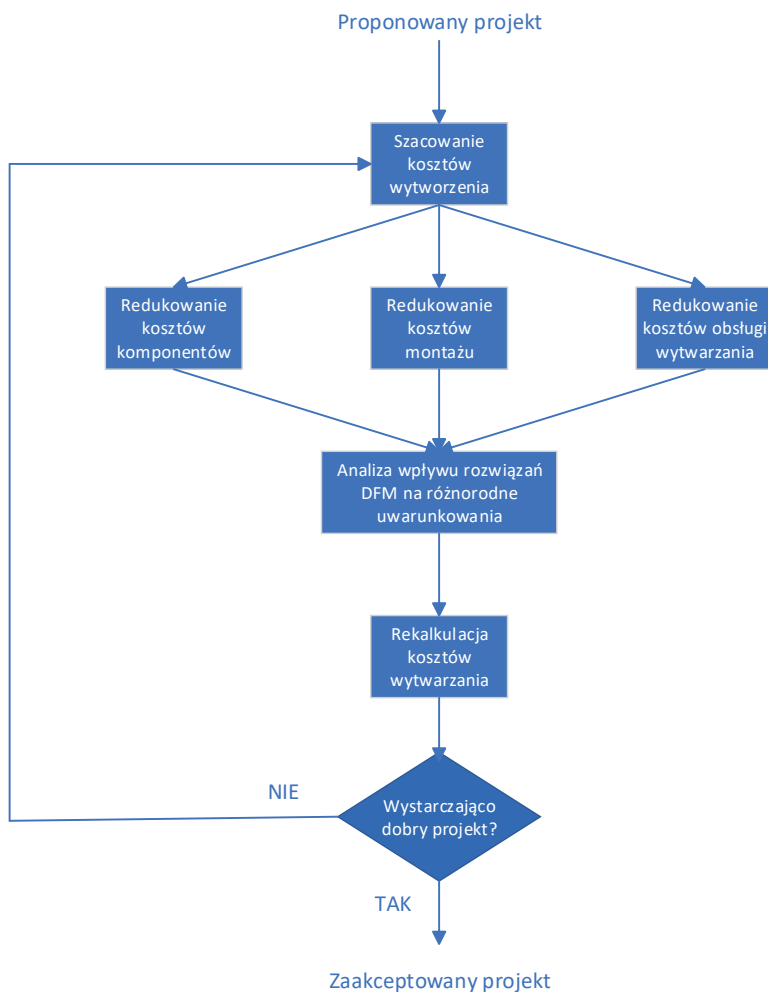
---

68 J. Bralla, *Design for Manufacturability Handbook*, New York 1998, s. 1.20–1.21.

- wykorzystania wysokiej odporności materiałów (telefon testowany był poprzez swobodne puszczenie go na betonową podłogę z wysokości 1 m),
- ogólnego wyglądu<sup>69</sup>.

Warto zwrócić uwagę, że zastosowane rozwiązania projektowe wpisują się zarówno w wytyczne projektowania Garvina, jak i Bralli'ę.

Z kolei Ulrich i Eppinger<sup>70</sup> zaproponowali oparcie metody DfM na aspekcie kosztów wytwarzania, widząc w tym rozwiązaniu iteracyjny sposób ich optymalizacji (rysunek 9).



**Rysunek 9.** Metoda projektowania wspomagającego wytwarzanie

**Źródło:** K. Ulrich, S. Eppinger, *Product Design and Development*, 5<sup>th</sup> ed., New York 2012, s. 257.

69 K. Ulrich, S. Eppinger, *Product Design...*, s. 208.

70 Tamże, s. 256–273.

Autorzy wyróżnili pięć podstawowych etapów metody DfM i zaliczyli do nich:

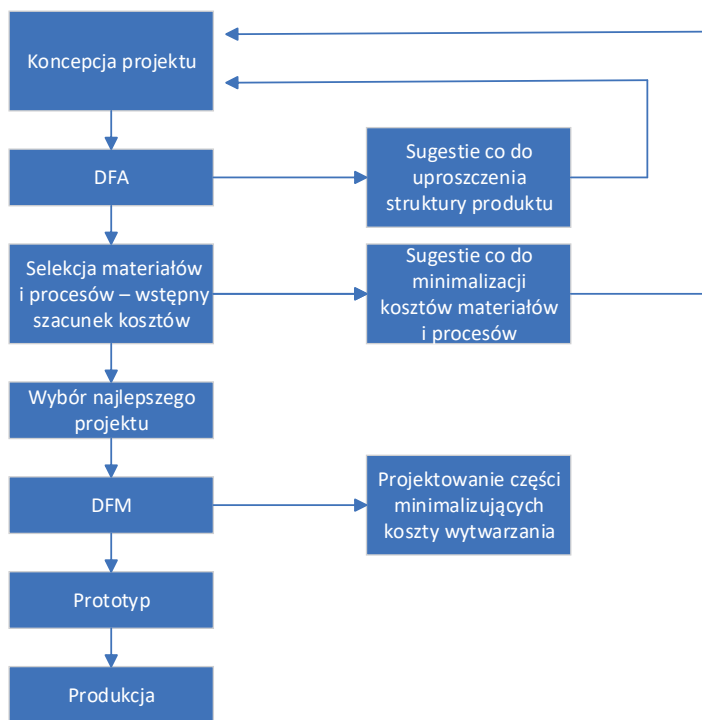
- 1) oszacowanie kosztów wytwarzania (kosztów komponentów z rozbiem na standardowe i niestandardowe, kosztów montażu z rozbiem na koszty pracownicze i koszty narzędziowe, kosztów ogólnych z rozbiem na koszty obsługi wytwarzania, np. związane z obsługą materiałów, zakupami, konserwacją, i koszty pośrednie, które są kosztami produkcyjnymi, ale niemogącymi być powiązanymi z konkretnym produktem),
- 2) redukcję kosztów (wymagającą zrozumienia ograniczeń procesów oraz identyfikacji czynników kosztotwórczych):
  - a) komponentów (redukcja komponentów z reguły eliminuje wybrane procesy, skracając cykl produkcyjny, zaleca się tutaj zakup komponentów uwzględniający ekonomię skali oraz zwracanie uwagi na sam proces zakupów),
  - b) montażu (szacowanie czasu montażu, integracja komponentów, maksymalne ułatwienie samego montażu lub też przerzucenie tego procesu na samego klienta),
  - c) obsługi wytwarzania (minimalizacja złożoności systemu produkcyjnego i obsługującego wytwarzanie projektowanego produktu, analiza przyczyn i skutków powstawania wad [*Failure Mode and Effect Analysis* – FMEA], aby już na etapie projektowania eliminować potencjalne wady),
- 3) analizę wpływu podjętych w ramach redukcji kosztów decyzji na inne uwarunkowania organizacyjne (czas, koszt i jakość związane z PD oraz wpływ na zewnętrzne czynniki związane z wykorzystaniem komponentów z innych produktów oraz oszacowaniem kosztów cyklu życia produktu).

Jak można zauważyć, wraz z kwestią samego wytwarzania Urlich i Eppinger poruszyli także kwestie montażu, co jest naturalną konsekwencją dokonywania zmian projektowych mających realny wpływ na kwestię kosztów, czasu i jakości projektowanych produktów. Boothroyd zaproponował połączenie DfM oraz DfA w jeden spójny system *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA), którego etapy powiązał z projektowaniem symultanicznym (SE) wykorzystującym metodę DFMA (rysunek 10).

Podobnie jak w przypadku Urlicha i Eppingera proces SE wykorzystujący DFMA przebiega w układzie iteracyjnym. Sama koncepcja projektu poddawana jest w pierwszej kolejności analizie DfA, która ma na celu zdefiniowanie rekomendacji upraszczających strukturę wyrobu w kontekście procesów montażowych.

Później następuje wprowadzenie zmian w produkcji, które to podlegają pierwotnej analizie ekonomicznej. W jej ramach zachodzi selekcja materiałów wraz ze wstępnym doбором procesów wytwórczych, stających się punktem wyjścia do przedstawienia wskazówek doskonalących produkt w kontekście racjonalizacji kosztów materiałów i procesów. W ten sposób powstaje ostateczna koncepcja projektu, która podlega krytycznej analizie i projektowaniu komponentów uwzględniającemu minimalne koszty wytwarzania. Kolejne fazy prototypowania i wytwarzania wprowadzają produkt w życie<sup>71</sup>.

71 G. Boothroyd, *Product design for Manufacture...*, s. 509–510.

**Rysunek 10.** Etapy SE wykorzystujące DFMA

**Źródło:** G. Boothroyd, *Product Design for Manufacture and Assembly*, „Computer-Aided Design” 1994, vol. 26, No. 7, s. 509.

Iteracyjność koncepcji zarówno Urlicha i Eppingera, jak i Boothroyda podkreśla złożoność całego procesu PD, a także tworzy kolejne etapy analiz projektowych, co z pewnością wydłuża cały proces PD. W ten sposób każde kolejne konteksty mogłyby stanowić następny etap analiz, np. kontekst środowiskowy, jakościowy itp., tworząc zespół metod analitycznych wspomagających procesy projektowania, a to z kolei stałoby się podwaliną koncepcji DfX.

Becker i Wits<sup>72</sup> określają koncepcję DfX jako szeroki zakres różnorodnych metod i technik projektowania, które są ukierunkowane na różne fazy cyklu życia produktu. Różnorodność celów poszczególnych metod i technik tworzy konflikty celów projektowych, a także doprowadza do sprzeczności obowiązujących w procesie projektowania zasad. Autorzy ci wskazali trzy podstawowe metody DfX, do których zaliczyli: projektowanie wspomagające wytwarzanie, projektowanie wspomagające montaż oraz projektowanie wspomagające demontaż (*Design for Disassembly* – DfD). Oprócz tego wskazali także inne wspierające produkty w różnych fazach ich cyklu

72 J. Becker, W. Wits, *A Template for Design for Excellence (DfX) Methods*, Proceeding, 23<sup>rd</sup> CRIP Design Conference, Bochum, Deutschland 2013, s. 33–42.



życia, np. projektowanie wspomagające zrównoważony rozwój (*Design for Sustainability* – DfS), łatwość konserwacji i napraw produktów (*Design for Maintainability* – DfMaint), żywotności produktu (*Design for Obsolescence* – DfO), łańcuch dostaw (*Design for Supply Chain* – DfSC), logistykę (*Design for Logistics* – DfL), sieciowość (*Design for Network* – DfN), recykling (*Design for Recycling* – DfR) i wiele innych<sup>73</sup>. Kwestii projektowania wspomagającego logistykę i łańcuchy dostaw, autor niniejszego opracowania poświęcił już książkę<sup>74</sup>, dlatego poniżej opisane zostaną jedynie pokrótce wspomniane przez Beckera i Witsa metody i techniki DfX.

Pierwotnie głównym celem projektowania wspomagającego demontaż (DfD) były korzyści ekonomiczne wynikające z możliwości odzyskania materiałów i części, które w fazie wycofania produktu z eksploatacji mogły zostać odzyskane i ponownie wykorzystane. Oczywiście drugi wymiar DfD ma charakter środowiskowy. W tym wymiarze pozytywny efekt stosowania DfD wynikał ze zmniejszonej masy zużytych produktów trafiających na wysypiska śmieci i zanieczyszczających środowisko<sup>75</sup>.

W 2007 roku Bogue stwierdził, że DfD stanie się krytyczną dla XXI wieku dyscypliną, bazującą na trzech głównych fundamentach<sup>76</sup>:

- 1) selekcji i doboru materiałów (wykorzystanie modułowości, minimalizacja liczby komponentów, maksymalizacja standaryzacji komponentów, minimalizacja dostępnych wariantów produktu),
- 2) zaprojektowania komponentów wraz z architekturą produktu (minimalizacja różnorodności wykorzystywanych materiałów, wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu, eliminacja materiałów toksycznych i niebezpiecznych),
- 3) selekcji, doboru i zatasowania złączy, łączników i elementów mocujących (minimalizacja różnorodności łączników i elementów mocujących, tworzenie łączników w taki sposób, aby były widoczne i miały łatwy dostęp, eliminacja ukrytych połączeń, wykorzystywanie połączeń, które są łatwe do demontażu oraz oznaczanie niestandardowych połączeń, wykorzystywanie łączników zamiast klejów lub innych substancji trwale mocujących).

Bogue wskazał także dwie kategorie uzupełniające fundamenty DfD (wraz z fundamentami określił je mianem reguł DfD), do których zaliczył:

- charakterystykę komponentów wspomagających demontaż (niska waga, dobra dostępność, trwałość i solidność części przy jednoczesnej minimalizacji delikatnych komponentów; eliminacja jakiegokolwiek toksyczności części i brak konieczności ich malowania),

73 Tamże, s. 33–34.

74 M. Bielecki, *Projektowanie wspomagające logistykę, Design for Logistics*, Łódź 2018.

75 O. Battaia, A. Dolgui, S. Sunderesh, S. Meerkov, M. Tiwari, *Design for Manufacturing and Assembly/Disassembly: Joint Design of Products and Production Systems*, „International Journal of Production Research” 2018, vol. 56(24).

76 R. Bogue, *Design for Disassembly: A Critical Twenty-First Century Discipline*, „Assembly Automation” 2007, vol. 27(4), s. 285–289.

- same warunki demontażu (wykorzystanie demontażu automatycznego lub bazującego na prostych i standardowych narzędziach, dostosowanie stanowiska i konstrukcji do demontażu)<sup>77</sup>.

Pomimo zaprezentowanych korzyści oraz zasad dotyczących DfD należy w tym miejscu zwrócić uwagę na szeroką grupę uwarunkowań, które mocno komplikują realizację rozwiązań związanych z tą metodą. Można je podzielić na kwestie techniczne i organizacyjne. Pierwsze dotyczą kwestii samego wyrobu. Należy tutaj uwzględnić rodzaj zastosowanych połączeń pomiędzy częściami, stopień odzysku i sprawność odzyskanych materiałów oraz części, ich jakość czy też wreszcie projektowanie nowych wyrobów uwzględniających odzyskiwane materiały i podzespoły. Druga grupa wiąże się ze złożonością i uniwersalnością linii demontażu, które w przeciwieństwie do linii montażowych nie podlegają regułom masowości produkcji, ale raczej charakteryzuje je typowość jednostkowa lub małoseryjna.

Innym wyzwaniem, które wynika poniekąd z wybranych kwestii technicznych, jest organizacja całego procesu, poczynając od bardzo skomplikowanego systemu logistyki zwrotnej, której celem jest odbiór wycofanych z eksploatacji produktów, poprzez wspomnianą już wcześniej kwestię organizacji linii demontażu (wyrównywania ich aktywności)<sup>78</sup>, a kończąc na aspektach logistycznych procesów identyfikacji części oraz ich transportu i magazynowania. Przyjmując bowiem założenie, że przedsiębiorstwo posiada pewne szerokości grup asortymentowych produktu, często mające różny czas cyklu życia, korygowany przez konsumentów, możliwość przewidywania terminu odbioru odzyskanych materiałów i podzespołów jest mocno niepewna. Skutkować to będzie szeregiem wyzwań logistycznych, które z pewnością nie będą obniżały kosztów pozyskania komponentów ze zużytych wyrobów.

Huang i inni, idąc krok dalej, tworzą koncepcję projektu opartego na chmurze, wykorzystującego DfD w celu stworzenia produktów przyjaznych środowisku<sup>79</sup>. Autorzy zaproponowali, aby demontowane komponenty podzielić na cztery podstawowe grupy, a więc podzespoły:

- wymagające specjalnej ochrony (ze względu na fakt, że zawierają one materiały niebezpieczne, powinny być przechowywane oraz utylizowane w sposób minimalizujący ich negatywny wpływ na środowisko),
- mogące podlegać sprzedaży (posiadające wartościowe materiały, które mogą być sprzedane, np. metale szlachetne),
- podlegające recyklingowi (nadające się do recyklingu, np. tworzywa sztuczne),
- podlegające ponownemu użyciu (komponenty umożliwiające montaż w nowym produkcie bez dodatkowych działań).

<sup>77</sup> Tamże, s. 287–288.

<sup>78</sup> M. Bentaha, A. Dolgui, O. Battaïa, R. Riggs, J. Hu., *Profit-Oriented Partial Disassembly Line Design: Dealing with Hazardous Parts and Task Processing Times Uncertainty*, „International Journal of Production Research” 2018, vol. 56(24), s. 7221–7242.

<sup>79</sup> Ch-Ch. Huang, W-Y. Liang, S-R. Yi, *Cloud-Based Design for Disassembly to Create Environmentally Friendly Products*, „Journal of Intelligence Manufacturing” 2017, vol. 28, s. 1210–1211.

Tak podzielone komponenty podlegałyby systemowi identyfikacji towarowej, a cała procedura projektowania wykorzystywałaby chmurę obliczeniową i posiadałaby trzy podstawowe podmioty:

- dostawcę oprogramowania projektowego zawierającego wytyczne DfD, np. poziomy trudności demontażu,
- projektantów w przedsiębiorstwach dobierających komponenty przy użyciu oprogramowania,
- dostawcę usług w chmurze zapewniającego komunikację pomiędzy dostawcami oprogramowania a projektantami w przedsiębiorstwach.

Takie rozwiązanie miałoby sens wyłącznie przy wysokim poziomie standaryzacji wykorzystywanych w procesie projektowania części oraz przy bardzo rygorystycznym procesie właściwej kwalifikacji zużytych komponentów oraz połączeń montażowych. Mnogość rozwiązań dostępnych na rynku może sprawić, że wybór właściwego komponentu nie zawsze będzie tak oczywistą sprawą.

Pomimo tego, że zagadnienie DfD wydaje się skomplikowane, należy zwrócić uwagę, że kwestie zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym mogą przyspieszyć wdrażanie tego typu rozwiązań. Roberts i inni<sup>80</sup> są przekonani, że właściwe projektowanie wspomagające demontaż może się stać kluczowym elementem w drodze przedsiębiorstw do osiągnięcia wytycznych gospodarki o obiegu zamkniętym. Praca wspomnianych autorów koncentruje się na kwestii rozbiórki budynków. W ten sposób DfD staje się elementem projektowania wspomagającego zrównoważony rozwój (DfS) i gospodarkę o obiegu zamkniętym (*Design for Circular Economy* – DfCE), środowisko (*Design for Environmental* – DfE) czy też *Eco-design* (EC).

Wątek ten podejmowany jest dalej przez Majmundara i Ansarię, którzy pokazują konieczność uwzględnienia kwestii zrównoważonego rozwoju w DfD<sup>81</sup>. Autorzy zwracają uwagę, że wątek badań nad DfD w kontekście wpływu na środowisko naturalne pojawił się już w roku 1992, kiedy to Boothroyd i Alting opisali wpływ projektowania wspomagającego montaż i demontaż na środowisko<sup>82</sup>. Następnie DfD prezentowane było w kontekstach recyklingu, cyklu życia produktu czy też zrównoważonego rozwoju<sup>83</sup>.

Projektowanie wspomagające środowisko, często przyjmujące nazwy ekoprojekt (*Eco-design* – EC), zielona inżynieria (*Green Engineering* – GEng) czy też projektowanie i produkcja ekologicznie świadoma (*Environmentally Conscious Design and*

80 M. Roberts, S. Sallen, J. Clarke, J. Searle, D. Coley, *Understanding the Global Warming Potential of Circular Design Strategies: Life Cycle Assessment of a Design-For-Disassembly Building*, „Sustainable Production and Consumption” 2023, vol. 37, s. 332.

81 M. Majmundar, Z. Ansari, *Design for Disassembly to Attain Sustainability: Analyzing the Past and Proposing Further Research Opportunities*, „The IUP Journal of Supply Chain Management” 2018, vol. XV(2), s. 37–76.

82 G. Boothroyd, L. Alting, *Design for Assembly and Disassembly*, „CIRP Annals – Manufacturing Technology” 1992, vol. 41(2), s. 625–636.

83 M. Majmundar, Z. Ansari, *Design for Disassembly to Attain...*, s. 39.

*Manufacturing* – ECD&M), opiera się na integracji aspektów środowiskowych podczas projektowania, rozwoju, a później wytwarzania produktu, co ma na celu przede wszystkim minimalizację negatywnego wpływu na środowisko produktu podczas całego cyklu jego życia. Jak podają Boks i Stevels<sup>84</sup>, cała koncepcja pojawiła się na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Tak jak inne teorie próbowano ją uchwycić w krótki, akronimowi zapis, który formułowałby jej zasady. Pierwsze jej rozwinięcia zawierały się w skrótach: „redukuj, ponownie używaj, poddawaj recyklingowi” (*Reduce, Reuse, Recycle* – RRR) lub „zapobieganie zanieczyszczeniom jest opłacalne” (*Pollution Prevention Pays* – PPP). Wspomniani autorzy pokazują także trzy poziomy świadomości środowiskowej w organizacji (tabela 1). Jak widać na podstawie tabeli 1, kwestia percepcji aspektów środowiskowych w organizacji rozpoczyna się od pojedynczych projektów, a kończy na poziomie organizacyjnych procedur, które systemowo regulują to zagadnienie.

Jak zauważają Rossi i inni<sup>85</sup>, jednym z głównych problemów związanych z DfE jest niski poziom efektywności wdrażania tego typu rozwiązań w przedsiębiorstwach przemysłowych. W literaturze przedmiotu dostępny jest szereg metod i narzędzi dotyczących ekoprojektowania, ale nie ma to przełożenia na konkretne rozwiązania projektowe. Problem nie leży bowiem w braku dostępności danych z zakresu DfE, ale w efektywności implementacji tych rozwiązań oraz niedużej liczbie strategii wspomagających i doskonalących proces DfE.

**Tabela 1.** Trzy poziomy świadomości środowiskowej w organizacji

Poziom dojrzałości świadomości środowiskowej	Zaangażowani pracownicy	Poziom szczegółowości	Niezbędne typowe narzędzia komunikacji
1	2	3	4
Wymagana praca nad uświadamianiem pracownika, zainicjowanie projektu z nowymi wytycznymi	Od poziomu osobistego do poziomu działu	Rozwiązania ogólne	Generalne założenia i slogany
Pracownik zaznajomiony z głównymi wytycznymi oraz kwestiami środowiskowymi, nadal jednak borykający się z podstawowymi problemami	Od poziomu działu do poziomu organizacji	Rozwiązania związane z potrzebami konkretnej branży	Listy kontrolne, wytyczne, przykłady dobrych praktyk

84 C. Boks, A. Stevels, *Essential Perspectives for Design for Environment, Experiences from the Electronics Industry*, „International Journal of Production Research” 2007, vol 45(18–19), s. 4021–4022.

85 M. Rossi, F. Cappelletti, M. Germani, *Design for Environmental Sustainability: Collect and Use Company Information to Design Green Products*, „Proceedings, Procedia CIRP Life Cycle Engineering Conference” 2022, vol. 105, s. 823–824.

Tabela 1 (cd.)

1	2	3	4
Wszystkie procedury znajdują się w miejscu pracy, pracownicy posiadają doświadczenie, powtarzają się problemy z uwzględnieniem kwestii środowiskowych przez organizację i jej łańcuch wartości	Od poziomu organizacji do poziomu łańcucha dostaw	Rozwiązania związane z potrzebami konkretnego produktu i procesu	Spersonalizowane i niestandardowe narzędzia, bazy danych posiadające informacje o wewnętrznym i zewnętrznym łańcuchu wartości, doświadczenie

**Źródło:** C. Boks, A. Stevels, *Essential Perspectives for Design for Environment, Experiences from the Electronics Industry*, „International Journal of Production Research” 2007, vol. 45(18–19), s. 4022.

Pigosso i inni<sup>86</sup> wyróżnili dziewięć podstawowych trendów badań związanych z DfE, zaliczając do nich badania nad:

- 1) rozwojem systemów produktów i usług ze względu na potencjał minimalizacji zużycia zasobów poprzez wydłużenia cyklu użytkowania wyrobów,
- 2) zrównoważonym projektowaniem (*Sustainable design* – SD), które wydaje się synonimem projektowania wspomagającego zrównoważany rozwój (DfS) – badania nad integracją zasad zrównoważonego rozwoju z projektowaniem i rozwojem produktu, zakładającego zbalansowanie kwestii środowiskowych, ekonomicznych i społecznych w kontekście produktu (nie zaś przedsiębiorstwa),
- 3) narzędziami oceny wyników zrównoważonego rozwoju produktów w ramach integracji oceny cyklu życia produktu (LCA), rachunku kosztów cyklu życia produktu (LCC) czy też społecznej oceny cyklu życia produktu (*Social Life Cycle Assessment* – S-LCA) i stworzenia wspólnej jednostki pomiarowej,
- 4) systemowym podejściem do DfE w celu zrozumienia relacji i interakcji pomiędzy poszczególnymi elementami systemu, co ma się przełożyć na zrozumienie wpływu decyzji projektantów na zachowania klientów wynikające z uwzględniania w produktach kwestii zrównoważonego rozwoju,
- 5) gospodarką o obiegu zamkniętym jako jedną ze strategii zrównoważonego rozwoju, pozwalającą projektantom uzyskać dostęp do nowych zasobów powstałych z odpadów po produktach, które zakończyły swój cykl życia (projektowanie wspomagające koniec cyklu życia produktu – *Design for End of Life* – DfE<sub>OL</sub>), bazujące na działaniach gospodarki cyrkularnej 10R, czyli

86 D. Pigosso, T. McAloone, H. Rozenfeld, *Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation*, „Journal of Indian Institute of Science” 2016, vol. 95, s. 414–415.

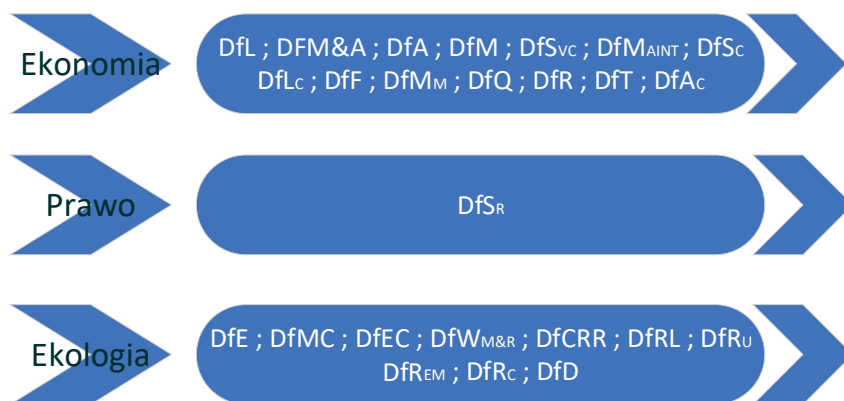
projektowaniu wspomagającym: odzyskać, poddawać recyklingowi, zmienić przeznaczenie, regenerować, odnawiać, naprawiać, ponownie używać, redukować, przemyśleć i odrzucić dotychczasowy sposób myślenia (*design for 10R* – Df10R) – ten typ projektowania może wspierać pojedyncze działania, ich grupy lub działać systemowo na całość,

- 6) powiązaniem pomiędzy rozwojem produktu a procesami biznesowymi jako rozszerzeniem ED na dodatkowe procesy organizacyjne, które mogą mieć potencjalny wpływ na produkt i jego ekologiczny kontekst,
- 7) uwzględnieniem ograniczenia zasobów w ocenie wpływu produktów i technologii na środowisko oraz społeczeństwo, co może inspirować do rozwoju bardziej innowacyjnych produktów,
- 8) kwestiami zarządczymi i strategicznymi podczas wdrażania rozwiązań związanych z ED, skutkującymi poszerzeniem postrzegania całej koncepcji nie tylko w sferze technicznej, ale także na strategicznym, taktycznym i operacyjnym gruncie organizacji, co może mieć wpływ na lepsze rezultaty podejmowanych działań,
- 9) integracją i konsolidacją istniejących koncepcji, podejść, metod, technik i narzędzi, która w wielu przypadkach stanowi barierę w skutecznym wdrażaniu koncepcji ED, co skutkuje pojawieniem się problemów związanych z optymalizacją doboru konkretnych rozwiązań.

Z kolei Benabdellah oraz Zekhnini<sup>87</sup> zaklasyfikowali do badań 30 technik DfX, wybranych z przeglądu literatury, klasyfikując je w trzech wymiarach zrównoważonego rozwoju, tzn.: ekonomii, równości i ekologii. Zaprezentowali oni kilka nowych technik DfX, jak choćby projektowanie wspierające społeczną odpowiedzialność (*Design for Social Responsibility* – DfS<sub>R</sub>) czy też minimalizujące odpad i wspierające odzysk (*Design for Waste Minimalization and Recovery* – DfW<sub>M&R</sub>). Klasyfikację technik DfX z uwzględnieniem wymiarów zrównoważonego rozwoju prezentuje rysunek 11.

87 A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST 2021, Tanger, Maroko 2021, s. 1.





**Rysunek 11.** Klasyfikacja technik DfX z uwzględnieniem wymiarów zrównoważonego rozwoju  
**Źródło:** A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST 2021, Tanger, Maroko 2021, s. 81.

Podsumowując wybrany przegląd literatury, można zauważyć, że wzrasta zainteresowanie problematyką zrównoważonego rozwoju w projektowaniu wyrobów, szczególnie w odniesieniu do wykorzystywanych metod i narzędzi DfX, a wzrost liczby publikacji wskazuje na poszerzanie się wiedzy z omawianego obszaru.

Wspomniani już Becker i Wits<sup>88</sup> wśród metod i technik DfX wskazali także projektowanie wspomagające naprawy i konserwację (serwisowanie) produktów (DfMaint). Guilo i Dixon<sup>89</sup> stwierdzili, że przy projektowaniu systemu lub produktu pod kątem łatwości serwisowania i naprawy, użytkownikowi przekazywane zostaje rozwiązanie, które nie powinno generować nadmiernych kosztów oraz obciążać go niepotrzebną startą czasu. Wśród głównych czynników, które – zdaniem autorów – projektant powinien wziąć pod uwagę, znalazło się osiem podstawowych uwarunkowań:

- 1) standaryzacja wykorzystywanych części,
- 2) identyfikowalność wykorzystywanych części,
- 3) modularyzacja struktury produktu,
- 4) wykorzystywanie zestawów naprawczych,
- 5) zamienność wymienianych części,
- 6) dostępność do serwisowanych komponentów,
- 7) łatwość w identyfikacji uszkodzeń,
- 8) możliwość wyizolowania uszkodzeń.

<sup>88</sup> J. Becker, W. Wits, *A Template for Design...*, s. 33–42.

<sup>89</sup> L. Gullo, J. Dixon, *Design for Maintainability Paradigms*, [w:] L. Gullo, J. Dixon (red.), *Design for Maintainability*, rozdz. 1, West Sussex 2021.



Jak widać, zaprezentowane czynniki w wielu przypadkach wiążą się z dużym uproszczeniem konstrukcji, ale także umożliwieniem użytkownikom wykonywania zadań serwisowych, co niejednokrotnie nie jest zgodne z modelami biznesowymi przedsiębiorstw.

Z kolei Taylor<sup>90</sup> w pierwszym rozdziale swojej książki zwraca uwagę na to, że łatwość konserwacji stanowi stopień, w jakim sam produkt umożliwia bezpieczną, bezproblemową, skuteczną i szybką wymianę części, a miarą takiego działania jest czas naprawy (przywrócenia) (*Time to Repair* – TTR). Autor podzielił także samo pojęcie konserwacji na konserwację:

- zapobiegawczą (wyznacznikiem wykonania czynności jest tu wpływający czas eksploatacji wyrobów, przepracowane godziny, przejechane kilometry itd., a jej podstawowa cecha to wymiana części jeszcze działających, które w najbliższym czasie mogą ulec awarii),
- naprawczą (dochodzi tu do awarii i unieruchomienia wyrobu bądź ograniczenia jego funkcjonalności, sytuacja jest nagła i wymaga podjęcia szybkich działań).

Same procesy konserwacji lub naprawy mogą odbywać się w trzech różnych wymiarach, tzn.:

- najbardziej dogodnym dla klienta miejscu, czyli tam, gdzie produkt jest użytkowany (konstrukcja produktu przewiduje możliwość wymiany części lub modułu bez konieczności transportu urządzenia),
- serwisie zlokalizowanym stosunkowo blisko klienta, do którego to użytkownik musi dostarczyć wyrób (takie miejsce wyposażone jest w specjalistyczny sprzęt, którego nie ma możliwości przetransportowania do punktu użytkowania produktu),
- zakładzie produkcyjnym, w którym to wyrób został wytworzony (na ogół dotyczy to wyrobów produkowanych jednostkowo i na zamówienie, stopień standaryzacji i modułowości uniemożliwia naprawy urządzenia w serwisie lub u klienta, wymagane są tutaj dodatkowy specjalistyczny sprzęt, umiejętności itp.).

Taylor poszerzył także zakres czynników, które powinny zostać uwzględnione w procesie DfMaint, zaliczając do nich:

- rozważenie faktu, że naprawialność jest włączana w wyrób w procesie jego projektowania i nie ma możliwości jej modyfikacji, gdy produkt już istnieje,
- ustalenie strategii konserwacji i napraw oferowanych produktów w kategoriach naprawy *versus* utylizacja, co będzie miało swoje konsekwencje w czasie ich użytkowania,
- wybór jednego z trzech miejsc przeprowadzania działań naprawczych i konserwacyjnych opisanych wcześniej,

90 A. Taylor, *Design-bites: Art and Engineering in Product Design, Design for Maintainability Principles, Modularity and Rules*, 2007, [https://www.design1st.com/Design-Resource-Library/design\\_tips/Design\\_for\\_Maintainability.pdf](https://www.design1st.com/Design-Resource-Library/design_tips/Design_for_Maintainability.pdf) [dostęp: 12.09.2024].

- konsultacje dotyczące potencjalnych napraw i wymian z ich bezpośrednimi realizatorami (mechanikami, inżynierami utrzymania ruchu itp.),
- projektowanie najprostszych rozwiązań, co wynika z faktu, że złożone układy są znacznie trudniejsze w utrzymaniu,
- projektowanie rozwiązań w możliwie największym stopniu testowalnych, np. poprzez tworzenie punktów diagnostycznych,
- zapewnienie niezawodności tym komponentom, które będą najtrudniej dostępne, co ogranicza potrzebę dostępu konserwacyjnego (projektowanie wspomagające żywotność produktu (DfO)),
- projektowanie sprzętu odpornego na awarie i zwiększanie żywotności komponentów produktu poprzez przewymiarowanie wybranych parametrów i zwiększenie ich wytrzymałości (DfO) – pozwala to w momentach krytycznych wytrzymać chwilowe przeciążenia,
- zapewnienie bezpieczeństwa poprzez stosowanie etykiet i znaków ostrzegawczych na konserwowanych elementach,
- projektowanie w głównej mierze komponentów wyrobu, które mogą być naprawiane rutynowo, a także zapewnienie dostępu do wiedzy serwisowej poprzez instrukcje, panele informacyjne dla niestandardowych rozwiązań,
- projektowanie komponentów produktu, które nie wymagają wykorzystania specjalnych narzędzi w procesach serwisowych<sup>91</sup>.

Jak widać, wymogi stawiane DfMaint oraz DfO w dużym stopniu są sprzeczne z praktykami projektowania wyrobów w drugiej dekadzie XXI wieku, w której to cykl życia produktu oraz jego części jest bardzo dokładnie kalkulowany przez producentów, co ma zapewnić możliwość sprzedaży nowo powstałych towarów. Dopiero w październiku 2019 roku UE uchwaliła dyrektywę, która z dniem 1 kwietnia 2021 roku narzuciła na producentów sprzętu AGD projektowanie wyrobów łatwych do naprawy, z dostępnością części zamiennych i przy użyciu powszechnie wykorzystywanych narzędzi<sup>92</sup>.

Babu i inni potwierdzają związek pomiędzy DfX a CE, zwracając uwagę, że koncepcja projektowania współbieżnego zmieniła tradycyjny proces projektowy, integrując go i obejmując różnorodne aspekty cyklu życia produktu i organizacji. W swojej klasycznej istocie CE koncentruje się na jakości (*Design for Quality* – DfQ)<sup>93</sup>, czasie (*Design for Minimum Manufacturing Time* – DfMMT) oraz koszcie (*Design for Cost* – DfC) jako klasycznych składowych wymagających optymalizacji w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Oprócz wspomnianych przez Beckera i Witsa technik DfX, autorzy zwracają uwagę także na projektowanie wspomagane

<sup>91</sup> Tamże.

<sup>92</sup> <https://repair.eu> [dostęp: 21.04.2023]; <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-right-to-repair> [dostęp: 21.04.2023].

<sup>93</sup> S. Das, V. Datla, G. Samir, *DFQM – An Approach for Improving the Quality of Assembled Products*, „International Journal of Production Research” 2000, vol. 38(2), s. 457–477.

minimalną wagą wyrobu (*Design for Minimal Weight* – DfMW), środowiskiem (*Design for Environment* – DfE), niezawodnością (*Design for Reliability* – DfR)<sup>94</sup>.

Podobnie odnieśli się do projektowania wspomagającego Darlington i Booker, przywołując koncepcję projektowania wspomagającego odporność na złamania zmęczeniowe materiału (*Design for Fatigue Resistance* – DfFR), które jest odpowiedzialne za większość uszkodzeń mechanicznych i związanych z tym kwestii bezpieczeństwa maszyn, urządzeń oraz strat ekonomicznych<sup>95</sup>.

Na wieloaspektowość koncepcji DfX zwracają uwagę także Pinozon Chica i inni, wskazując możliwość komputerowego wspomagania (*Computer Aided* – CA) procesu DfX systematycznym podejściem komputerowego wspomagania projektowania (*Computer Aided Design* – CAD), co stanowi składową komputerowego wspomagania inżynierii (*Computer Aided Engineering* – CAE)<sup>96</sup>.

Riou i Mascle uzupełnili koncepcję DfX o komponent pojęciowy, tzn. zintegrowany rozwój produktu (*Integrated Product Development* – IPD) umożliwiający jego etapowe projektowanie z równoległym dopracowaniem specyfikacji, uwzględniającym takie zagadnienia jak montaż końcowy lub inne zadania związane z projektowaniem i rozwojem produktu. Autorzy zauważyli, że praktycznie od lat osiemdziesiątych XX wieku następuje systematyczny rozwój produktów mający na celu przede wszystkim obniżkę kosztów oraz czasu ich wejścia na rynek przy równoczesnym utrzymaniu odpowiedniej jakości<sup>97</sup>.

Opócz wskazanych metod, technik i narzędzi wspomagających DfX poprzez analizę literatury zidentyfikowano jeszcze następujące pojęcia tematycznie związane z opisywanym zagadnieniem, czyli projektowaniem wspomagającym:

- automatyzację (*Design for Automation* – DfA<sub>TM</sub>)<sup>98</sup>,
- dostawę (*Design for Delivery* – DfD<sub>LV</sub>)<sup>99</sup>,
- usługi (*Design for Services* – DfS<sub>VC</sub>)<sup>100</sup>,

94 B. Babu, R. Durai Prabhakaran, V. Agrawal, *DFX Analysis Applied to Composite Products*, „Journal of Reinforced Plastics and Composites” 2008, vol. 27(3), s. 287–288.

95 J. Darlington, J. Booker, *Concept Design for Fatigue Resistance*, „Journal of Engineering Design” 2010, vol. 21(5), s. 497–498.

96 R. Pinzon Chica, S. Lascano, H. Maury-Ramirez, *Design for Manufacturing and Assembly and CAE Tools: The Case of a Rice Husker*, „Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International DAAAM Symposium” 2011, vol. 22(1), s. 1339–1340.

97 A. Riou, Ch. Mascle, *Assisting Designer Using Feature...*, s. 1034–1035.

98 G. Barbosa, J. Carvalho, *Analytical Model for Aircraft Design Based on Design for Excellence (DFX) Concepts and Use of Composite Material Oriented to Automated Processes*, „International Journal Advance Manufacturing Technology” 2013, vol. 69, s. 2333–2334.

99 D. Prajapati, M. Kumar, S. Pratap, H. Chelladurai, M. Zuhair, *Sustainable Logistics Network Design for Delivery Operations with Time Horizons in B2B E-Commerce Platform*, „Logistics”, vol. 5(61), s. 1–12.

100 A. Pirinen, *The Barriers, and Enablers of Co-design for Services*, „International Journal of Design” 2016, vol. 10(3), s. 27–42.

- elastyczność (*Design for Flexibility* – DfF)<sup>101</sup>,
- testowalność (*Design for Testability* – DfT)<sup>102</sup>,
- adaptowalność (*Design for Adaptability* – DfAD)<sup>103</sup>,
- minimalizujące ślad węglowy w produkcie (*Design for Low Carbon* – DfLC; *Product Low Carbon Design* – PLCD)<sup>104</sup>,
- projektowanie aksjomatyczne (*Axiomatic Design* – AX; model projektowania, który w swoim procesie wykorzystuje dwa aksjomaty – konieczność zachowania niezależności wymagań funkcjonalnych i minimalizację informacji niezbędnych do ich spełnienia; dobry projekt powinien spełniać różne wymagania funkcjonalne niezależnie i w prosty sposób)<sup>105</sup>.

Jak widać, zaprezentowane obszary, które są wspomagane poprzez projektowanie, mają bardzo dużą różnorodność i szczegółowość. Bierze się ona z faktu braku przypisania poszczególnych metod DfX do bardziej ogólnych zagadnień, przez co powstaje swoisty problem z ich umiejscowieniem.

Chcąc dokonać syntezy różnorodnych zagadnień związanych z DfX oraz ustrukturyzowania zaprezentowanych przykładów projektowania wspomagającego, można wykonać przynajmniej kilka podziałów różniących się swoją kontekstowością. Warto wskazać tu klasyfikację chociażby ze względu na metody projektowania wspomagające:

- 1) łańcuch wartości przedsiębiorstwa, a więc na podstawie łańcucha wartości Portera<sup>106</sup> czynności podstawowe, bezpośrednio związane wyrobem końcowym (np. wytwarzanie i montaż, logistykę, marketing, usługi posprzedażowe), a także wybrane czynności pomocnicze (np. zmiany technologiczne, dość dużym wyzwaniem byłoby projektowanie produktów wspomagających zarządzanie infrastrukturą czy też kapitałem społecznym itp.),
- 2) cele modeli biznesowych przedsiębiorstw (np. czas, koszt, jakość, ale też elastyczność, niezawodność, terminowość),
- 3) różne fazy cyklu życia produktu (np. BoL, MoL i EoL),

101 D. Schneider, T. Frohlich, T. Huth, T. Vietor, *Design for Flexibility – Evaluation Interactions between Product Properties and Production Processes*, „Procedia CIRP” 2020, vol. 91, s. 814–818.

102 L.-T. Wang, X. Wen, K. Abdel-Hafez, *Design for Testability*, [w:] L.-T. Wang, Ch. Wu, X. Wen (red.), *VLSI Test Principles and Architectures: Design for Testability*, The Morgan Kaufmann Series in Systems on Silicon, Amsterdam 2006, s. 37–103.

103 M. Kasarda, J. Terpenney, D. Inman, K. Precoda, J. Jelesko, A. Sahin, J. Park, *Design for Adaptability (DFAD) – a New Concept for Achieving Sustainable Design*, „Robotics and Computer-Integrated Manufacturing” 2007, vol. 23(6), s. 727–734.

104 X. Ai, Z. Jiang, H. Zhang, Y. Wang, *Low-carbon Product Conceptual Design from The Perspectives of Technical System and Human Use*, „Journal of Cleaner Production” 2020, vol. 244.

105 L. Beng, B. Omar, *Integrating Axiomatic Design Principles into Sustainable Product Development*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology” 2014, vol. 1(2), s. 107–117.

106 M. Porter, *Przewaga konkurencyjna. Osiąganie i utrzymywanie lepszych wyników*, Gliwice 2006, s. 61–65.

- 4) aktualne trendy technologiczno-ekonomiczno-społeczne (np. zrównoważony rozwój – SD, gospodarkę o obiegu zamkniętym – CEcon, minimalizację śladu węglowego, Industry 4.0).

Granica zaproponowanego podziału jest niezwykle płynna i krucha, ponieważ niektóre metody mogą występować równocześnie w różnych podziałach, ale także mogą być częścią składową większych grup, np. relacja pomiędzy projektowaniem wspomagającym wagę produktu a projektowaniem wspomagającym logistykę.

Podobnie rzecz się ma do kwestii nadania priorytetu kolejnym metodom DfX. Nie bez znaczenia było to, że jako pierwsze rozwiązania powstawały te metody DfX, np. DFM czy DfA, które w jednoznaczny sposób przekładały się na kwestie racjonalizacji procesów wytwarzania czy też montażu. Cele związane z elastycznością, minimalizacją kosztów, zwiększaniem terminowości czy też elastyczności ustawione były także pod kątem potencjalnych korzyści wynikających z optymalizacji i racjonalizacji procesów wytwórczych i montażowych wskutek zastosowania odpowiednich rozwiązań projektowych. Ten sposób patrzenia na kwestie projektowania produktu wyraźnie nakreśla sposób działania biznesu – tam, gdzie rozwiązanie przekłada się na konkretne, wymierne i policzalne efekty, jest ono implementowane.

Z punktu widzenia prezentowanego opracowania szczególnie czwarty podział wydaje się interesujący ze względu na stojące za nim wyzwania w sferze przede wszystkim środowiska naturalnego i celów zrównoważonego rozwoju (SD, CEcon, ślad węglowy – *Carbon Footprint* – CF) oraz technologii I 4.0, np. Internet Rzeczy (IoT), inteligentne produkty (*Smart Products* – SP), inteligentne maszyny (*Smart Machines* – SM), cyberbezpieczeństwo i technologię blokową (*Cyber-Security & Blockchain* – CSB), sztuczna inteligencja (AI), automatyka (*Automation* – At), technologia analizy dużych zbiorów danych (*Big Data Analytics* – BDA), technologia chmury obliczeniowej (*Cloud Technologies* – CT), systemy komunikacji pomiędzy maszynami (*Machine to Machine Communication* – M2M), technologia wykorzystująca fale radiowe (RFID), technologia sensorów (*Sensors Technologies* – ST), cyfryzacja (*Digitalization* – Dt), robotyka (*Robotics* – Rb), wszechkanałowość (*Omni Channel* – OC), systemy optymalizacji (*Optimization Systems* – OS), analityka biznesowa (*Business Intelligence* – BI), druk 3D (*3D-Printing* – 3DP), aplikacje mobilne (*Mobile Apps* – MA), systemy zarządzania zasobami przedsiębiorstwa (*Enterprise Resources Planning* – ERP), rozszerzona rzeczywistość (*Augmented Reality* – AR) i nanotechnologia (*Nanotechnology* – Nt)<sup>107</sup>, które można zamknąć w kolejnym rozwiązaniu DfX, tzn. projektowaniu wspomagającym przemysł 4.0 (*Design for Industry 4.0* – DfI4.0).

Dość duża różnorodność zaprezentowanych metod, technik lub koncepcji projektowania wspomagającego doskonałość z pewnością nie wyczerpuje wszystkich dostępnych w literaturze rozwiązań DfX. Zachęca jednak do ich pewnego uporządkowania. Wynika to głównie z zakresu ogólności i szczegółowości danych rozwiązań,

107 G. Federico, J. Garza-Reyes, A. Anosike, V. Kumar, *Supply Chain 4.0: Concepts, Maturity and Research Agenda*, „Supply Chain Management: An International Journal” 2019, vol. 25(2), s. 17–18.

który w wyraźny sposób pozwala zauważyć, że można mieć tu do czynienia z pewnymi koncepcjami nadrzędnymi, które są uzupełniane bardziej szczegółowymi narzędziami. Wydaje się, że na chwilę obecną zaprezentowane rozwiązania DfX można skumulować w następujących nurtach:

- **zrównoważonego rozwoju** (projektowanie wspomagające działania gospodarki cyrkularnej – Df10R, gospodarka cyrkularna – DfCE, środowisko – DfE, koniec cyklu życia produktu – DfE<sub>OL</sub>, zmniejszanie śladu węglowego w produkcie – DfL<sub>C</sub>, żywotność produktów – DfO, recykling – DfR, zrównoważony rozwój – DfS),
- **wytwarzania** (projektowanie wspomagające wytwarzanie – DfM, montaż – DfA, automatyzacja – DfA<sub>TM</sub>, minimalizacja kosztów – DfC, demontaż – DfD, elastyczność – DfE, odporność na złamania zmęczeniowe materiału – DfFR, minimalizacja czasu wytwarzania – DfM<sub>MT</sub>, sieciowość – DfN, jakość – DfQ, testowalność – DfT, przemysł 4.0 – DfI4.0, logistyka – DfL, wspomaganie dostaw – DfD<sub>LV</sub>, minimalna waga produktu – DfM<sub>w</sub>, łańcuch dostaw – DfS<sub>C</sub>),
- **wartości dla klienta** (projektowanie wspomagające adaptowalność – DfA<sub>TM</sub>, odporność na złamania zmęczeniowe materiału – DfF<sub>R</sub>, konserwacja i naprawy – DfM<sub>AINP</sub>, sieciowość – DfN, jakość – DfQ, niezawodność – DfR, łańcuch dostaw – DfS<sub>C</sub>, usługi – DfS<sub>VC</sub>),
- **łańcuchów dostaw** (projektowanie wspomagające logistykę – DfL, łańcuch dostaw – DfS<sub>C</sub>, jakość – DfQ, sieciowość – DfN).

Jak widać z zaprezentowanego podziału, nie wszystkie rozwiązania DfX można jednoznacznie przypisać do tylko jednej kategorii. I tak np. projektowanie wspomagające żywotność produktów zostało zaklasyfikowane do dwóch obszarów – zrównoważony rozwój oraz wartość dodana dla klienta, podobnie jak projektowanie wspomagające jakość (DfQ), tzn. wytwarzanie i montaż, oraz wartość dodana dla klienta (rysunek 12).

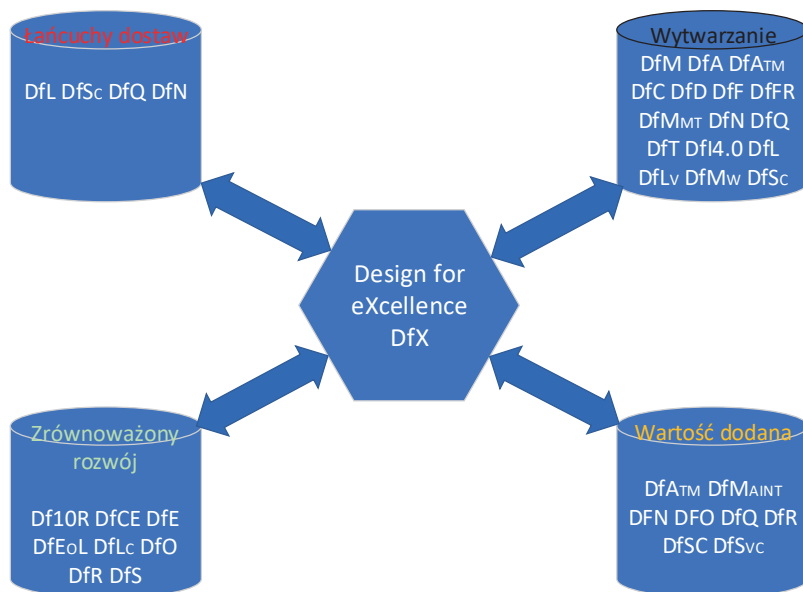
Zaproponowane trzy główne nurty związane z procesem projektowania oraz koncepcją DfX implikują nowe wyzwania, które stają przed projektantami. Pierwsze z nich wiąże się z realizacją celów zrównoważonego rozwoju, w tym implementacji działań i zasad gospodarki cyrkularnej podczas projektowania wyrobów oraz w całym cyklu ich życia.

Drugie łączy się z wytwarzaniem i w coraz mniejszym stopniu dotyczy kwestii odnoszących się do podnoszenia wydajności i efektywności produkcji, które od momentu pojawienia się linii montażowej Forda były badane i opisywane w literaturze. Znacznie ciekawszym wyzwaniem odnoszącym się bezpośrednio do obszaru wytwarzania jest projektowanie wyrobów uwzględniające koncepcję I4.0 wraz z całą gamą jej metod, technik, instrumentów i narzędzi.

Trzeci wyodrębniony obszar odnosi się do kwestii projektowania wyrobów, ze szczególnym uwzględnieniem wartości dla klienta. Szereg cech, właściwości, funkcjonalności i innych fizycznych atrybutów produktu decyduje o jego wartości. Kiedy włączy się do tego jego elementy niematerialne, np. markę, da się zauważyć, że sam



produkt z punktu widzenia projektanta staje się mocno złożonym obiektem. Po dodaniu zmian pokoleniowych skutkujących przekształcaniem zachowań klientów na rynku, można stwierdzić, że zakres opisywanego zagadnienia jest jeszcze bardziej skomplikowany.



**Rysunek 12.** Dominujące obszary DfX

**Źródło:** opracowanie własne.

Zrównoważony rozwój, gospodarka o obiegu zamkniętym czy też strategia I 4.0 dostarczają szeregu wyzwań, które z pewnością mogą zredefiniować funkcjonowanie przedsiębiorstw, a co za tym idzie – projektowanie wyrobów. Wskazane byłoby zatem przeprowadzanie systematycznego przeglądu literatury dotyczącej wspomnianych zagadnień, na bazie którego można byłoby uchwycić trendy zmian w projektowaniu wyrobów, a więc także w samej koncepcji DfX.

W kolejnym rozdziale postanowiono zająć się zagadnieniami, które z punktu widzenia projektowania produktów – zdaniem autora – mogą stać się ważnymi kierunkami zmian dla projektantów. W tym celu postanowiono dokonać krytycznego przeglądu literatury dotyczącej następujących zagadnień ze sfery projektowania w kontekście DfX, tzn. projektowania wspomagającego lub uwzględniającego:

- środowisko (zrównoważony rozwój, gospodarka cyrkularna, zielone PD),
- technologie (uwzględnianie technologii strategii I 4.0 w projekcie produktu, zwłaszcza wirtualnej rzeczywistości, Internetu Rzeczy oraz sztucznej inteligencji).

Zaproponowane obszary w sposób naturalny ukształtują strukturę kolejnego rozdziału.





## Rozdział 2

# Projektowanie i rozwój produktów w aspekcie środowiskowym i technologicznym

Dostępność zasobów literaturowych i publikacyjnych poprzez wykorzystanie technologii informatycznych, w tym Internetu, znacząco się zwiększyła. Cyfryzacja zbiorów bibliotecznych stwarza badaczom możliwości natychmiastowego dotarcia do pozycji, które w przypadku zbiorów klasycznych niejednokrotnie wymagały czasu (oczekiwanie na powrót z wypożyczenia czy też na wypożyczenie międzybiblioteczne). Digitalizacja bibliotek doprowadziła także do zjawiska przyrostu pozycji literaturowych na skalę dotychczas niespotykaną. Dlatego sam przegląd opracowań wymaga odmiennego niż dotychczas podejścia, uwzględniającego zachodzące zmiany.

W ramach pozyskiwania danych wejściowych należy zdać sobie sprawę, że kluczowym elementem powinna być jakość pozyskiwanych danych. Jeśli do procesu dostarczy się dane niskiej jakości, nieistotne czy też nieprawidłowe, to otrzymane na wyjściu wyniki w myśl zasady GIGO (*Garbage In/Garbage Out*) będą także nieefektywne, nieistotne i niskiej jakości.

W tym rozdziale zaprezentowane zostaną wybrane zagadnienia dotyczące etapów i modeli przeglądu literatury. Na tej podstawie dokonamy opisu metody i wyników badań literaturowych prowadzonych w pierwszym półroczu 2023 roku.

## 2.1. Metoda badań literaturowych

Mówiąc o metodach badań literaturowych, w pierwszej kolejności należałoby przywołać kilka publikacji metodycznych.

Webster i Watson sugerują, aby dokonując analizy literaturowej, na początku przeszukiwać wiodące czasopisma z baz takich jak ProQuest, ponieważ pozwalają one przyspieszyć identyfikację wiodących artykułów. W pozyskiwaniu danych wejściowych nie należy zapominać także o materiałach konferencyjnych, które często stanowią dobre źródło informacji. Dopiero krytyczny przegląd wyłonionej literatury wraz z publikacjami ze spisów treści pozwala wykonać krok do przodu i wyodrębnić te artykuły, których indeks cytowań może być najwyższy<sup>1</sup>.

Sam proces przetwarzania danych zawiera w sobie zaznajomienie się z wybraną literaturą, jej zrozumienie, zastosowanie, przeanalizowanie, syntetyzowanie i ocenianie<sup>2</sup>.

Proces formułowania wyników związany jest z kwestią argumentacji. Levy i Ellis<sup>3</sup> przywołali w tym miejscu model argumentacji Williamsa i Colomba<sup>4</sup> opierający się na trzech podstawowych elementach: twierdzeniu („twierdzę, że...”), powodzie twierdzenia („z tego powodu...”) oraz dowodzie twierdzenia („bazując na konkretnym dowodzie...”).

Z kolei Rowley i Slack<sup>5</sup> wyróżnili cztery podstawowe aspekty procesu związanego z tworzeniem przeglądu literatury:

- 1) ocena źródeł informacji (pozycja literaturowa powinna być np. adekwatna do tematu nadań czy też aktualna),
- 2) wyszukiwanie i lokalizowanie zasobów informacyjnych (wiąże się to na ogół z wykorzystaniem różnorodnych narzędzi, np. katalogów bibliotecznych, narzędzi do przeszukiwania, internetowych baz danych bibliometrycznych)<sup>6</sup>,
- 3) tworzenie ram koncepcyjnych i map myśli (może ona przypominać zaproponowaną przez Czakona „chmurę słów” uzupełniającą słowa kluczowe o dodatkowe zwroty)<sup>7</sup>,

---

1 J. Webster, R.T. Watson, *Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review*, „MIS Quarterly” 2002, vol. 26(2), s. 16.

2 Y. Levy, T. Ellis, *A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research*, „Informing Science” 2006, vol. 9, s. 192–201.

3 Tamże, s. 201–203.

4 J. Williams, G. Colomb, *The Craft of Argument*, 2<sup>nd</sup> ed., New York 2003, s. 42.

5 J. Rowley, F. Slack, *Conducting a Literature Review*, „Management Research News” 2004, vol. 27(6).

6 Tamże, s. 33–34.

7 W. Czakon, *Metodyka systematycznego przeglądu literatury*, „Przegląd Organizacji” 2011, nr 3(854), s. 60.

- 4) pisanie przeglądu literatury (np. analiza dokumentów pod kątem pokrewieństwa tematycznego czy też opracowania kompletnej bibliografii<sup>8</sup> – sam proces przetwarzania danych zawiera w sobie zaznajomienie się z wybraną literaturą, jej zrozumienie, zastosowanie, przeanalizowanie, syntetyzowanie i ocenianie)<sup>9</sup>.

Akbari i Do zaproponowali także czteroetapowy proces ustrukturalizowanego przeglądu literatury, do którego zaliczyli:

- określenie horyzontu czasowego,
- wybór czasopism z bazy (w tym wypadku Scopus),
- klasyfikację wybranych artykułów wg konkretnych parametrów, takich jak lokalizacja geograficzna, rok publikacji czy też metoda badawcza,
- analizę sklasyfikowanych publikacji pod kątem luk badawczych, znaczących odkryć czy też ograniczeń oraz kierunków przyszłych badań<sup>10</sup>.

Levy i Ellis sugerują, że proces przeglądu literatury powinien mieć trzy podstawowe etapy: pozyskiwanie danych wejściowych, proces przetwarzania, formułowanie wyników<sup>11</sup>, a Booth, Sutton i Papaioannou<sup>12</sup> zaproponowali model przeglądu literatury bazujący na akronimie SALSA (*Search, Appraisal, Synthesis, Analysis*).

Ci sami autorzy wskazali także wiele typów i modeli przeglądu literatury, które mogą przybierać różne odmiany. Wyróżnili oni następujące metody badania/przeglądu literatury:

- krytyczna (wykazuje rozległość badań, krytycznie je ocenia, poszukuje innowacyjności kompetencyjnej, dąży do opracowania modelu lub postawienia hipotez, łączy podejście krytyczne z wyczerpującym wyszukiwaniem<sup>13</sup>),
- integracyjna (najszerszy rodzaj badań, koncentruje się na analizie zarówno aspektów teoretycznych, jak i praktycznych),
- literaturowa (skoncentrowana na dostępnej, najnowszej literaturze i wynikach badań),
- mapująca (kategoryzuje dostępną literaturę w celu uchwycenia luk badawczych),
- metaanalizyczna (dostarcza informacji statystycznych),
- mieszana (łączy badania ilościowe, jakościowe, wyników, procesów itp.),
- przeglądowa (charakteryzuje wyniki badań literaturowych),
- systematyzująca (porównuje lub integruje badania jakościowe),
- szybka (ocenia aktualne i dostępne wyniki),

8 J. Rowley, F. Slack, *Conducting a Literature...*, s. 38.

9 Y. Levy, T. Ellis, *A Systems Approach to Conduct...*, s. 192–201.

10 M. Akbari, T. Do, *A Systematic Review of Machine Learning in Logistics and Supply Chain Management: Current Trends and Future Directions*, „Benchmarking: An International Journal” 2021, vol. 28(10), s. 2980.

11 Y. Levy, T. Ellis, *A Systems Approach to Conduct...*, s. 182–183.

12 A. Booth, A. Sutton, D. Papaioannou, *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, Los Angeles 2012, s. 24–26.

13 Tamże.

- syntezująca (łączy duży i zróżnicowany dobór literatury w celu weryfikacji obecnych trendów),
- zakresowa (charakteryzuje i opisuje zakres badań i literatury),
- najnowsza (*State-of-The-Art* – STAR; odnosi się do spraw bieżących, poszukuje nowego spojrzenia na zagadnienie),
- systematyczna (łączy podejście krytyczne z wyczerpującym wyszukiwaniem),
- parasolowa (podsumowuje wyniki przeglądów systematycznych).

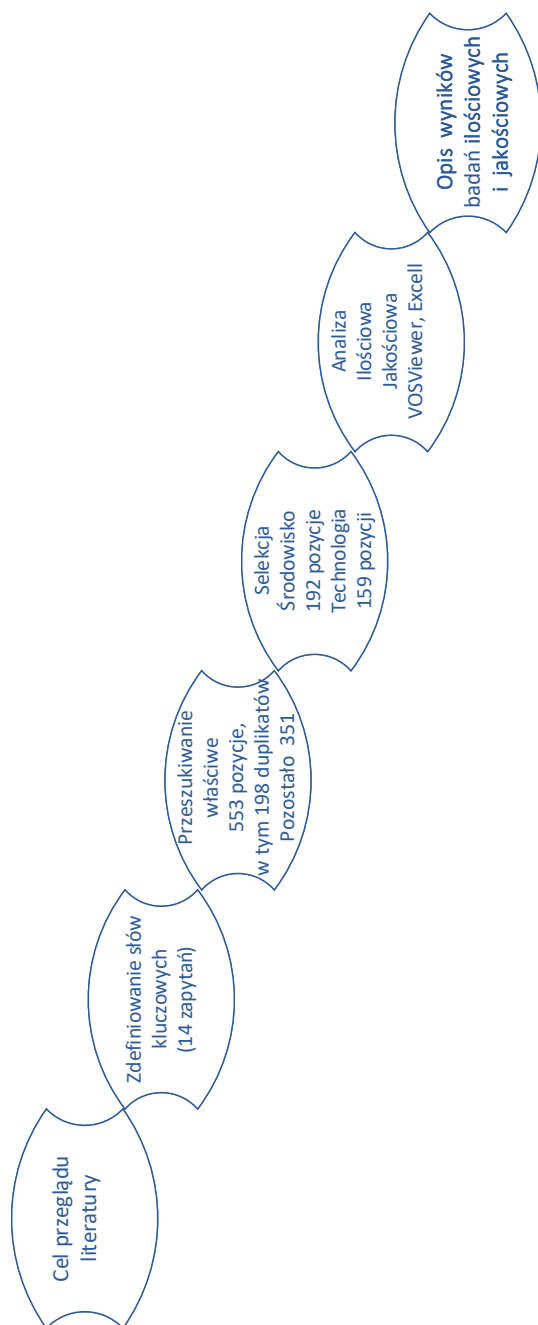
Odnosząc się do omawianego w pracy tematu oraz sformułowanych pytań badawczych, postanowiono wybrać metodę systematycznego przeglądu literatury STAR, aby poszukać najnowszego spojrzenia na zagadnienie projektowania DfX w kontekście trzech kluczowych nurtów mających istotny wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstw, tzn.: zrównoważonego rozwoju, gospodarki o obiegu zamkniętym, a także koncepcji przemysłu 4.0.

Sam proces przeglądu literatury metodą STAR postanowiono przeprowadzić wg następujących etapów<sup>14</sup>:

- 1) sformułowanie celów przeglądu literatury powiązanych z celami pracy,
- 2) zdefiniowanie słów kluczowych wraz z algorytmem ich wyszukiwania oraz doбором baz literaturowych, które będą podlegać procesowi przeszukiwania,
- 3) przeprowadzenie właściwego procesu przeszukiwania i stworzenie bazy danych artykułów połączone z usuwaniem artykułów, które się dublują,
- 4) przeszukiwanie i selekcja artykułów pod kątem ich jakości i adekwatności do tematu oraz wybór tych, które podlegać będą dalszej analizie (przegląd artykułów pod kątem tytułu, słów kluczowych oraz abstraktów),
- 5) analiza wyselekcjonowanej literatury (przegląd całych artykułów) pod kątem realizacji sformułowanych celów przeglądu literatury oraz celów pracy,
- 6) opis wyników badań w konkretnych podrozdziałach poświęconych omawianym zagadnieniom (rysunek 13).

Prezentowany przegląd literatury odnosi się do dwóch postawionych w pracy pytań badawczych, tzn.: Jak kształtuje się aktywność publikacyjna dotycząca projektowania i rozwoju produktów (DfX) w kontekście zidentyfikowanych w pracy wyzwań (zagadnień zrównoważonego rozwoju, gospodarki o obiegu zamkniętym oraz strategii I 4.0) oraz jakie są aktualne trendy zmian projektowania i rozwoju produktów (DfX) w kontekście wspomnianych wyzwań? Głównym celem jest identyfikacja najnowszych trendów procesu projektowania i rozwoju produktu w kontekście wyzwań zidentyfikowanych w monografii, związanych ze zrównoważonym rozwojem, gospodarką o obiegu zamkniętym oraz zagadnieniami łączącymi się z Industry 4.0.

14 A. Sudarson, Ch. Kurukkanari, D. Bendi, *A State-of-the-art Review on Readiness Assessment Tools in The Adoption of Renewable Energy*, „Environmental Science and Pollution Research” 2023, vol. 30, s. 32215–32216.



**Rysunek 13.** Kolejne etapy przeglądu literatury metodą STAR  
**Źródło:** opracowanie własne.

Aby zrealizować główny cel przeglądu literatury, zdecydowano się na przeszukiwanie dwóch najbardziej popularnych baz bibliograficzno-abstraktowych, tzn. Scopus oraz Web Of Science. Przeszukiwano je wg tytułów artykułów napisanych tylko w języku angielskim, które miały posiadać w sobie zestawy słów kluczowych odnoszące się do kwestii środowiskowych<sup>15</sup> (zrównoważony rozwój, gospodarka o obiegu zamkniętym, zielony rozwój i projektowanie wyrobu) oraz kwestii związanych z przemysłem 4.0 i jego najciekawszymi, zdaniem autora, technologiami, tzn. sztuczną inteligencją, wirtualną rzeczywistością i Internetem Rzeczy<sup>16</sup>. W ten sposób sformułowano 14 zestawów słów kluczowych, na podstawie których przeprowadzono przeszukiwanie baz 14 zapytań, tzn.:

- 1) *Product Design* oraz *Circular Economy* (PD&CE),
- 2) *Product Design* oraz *Sustainable Development* lub *Product Design* oraz *Sustainability* (PD&SD),
- 3) *Green Product Design* (GPD),
- 4) *Product Development* oraz *Circular Economy* (PDvlp&CE),
- 5) *Product Development* oraz *Sustainable Development* lub *Product Development* oraz *Sustainability* (PDvlp&SD),
- 6) *Green Product Development* (GPDvlp),
- 7) *Product Design* oraz *Industry 4.0* (PD&I 4.0),
- 8) *Product Design* oraz *Artificial Intelligence* (PD&AI),
- 9) *Product Design* oraz *Virtual Reality* (PD&VR),
- 10) *Product Design* oraz *Internet of Things* (PD&IoT),
- 11) *Product Development* oraz *Industry 4.0* (PDvlp&I 4.0),
- 12) *Product Development* oraz *Artificial Intelligence* (PDvlp&AI),
- 13) *Product Development* oraz *Virtual Reality* (PDvlp&VR),
- 14) *Product Development* oraz *Internet of Things* (PDvlp&IoT).

Następnie zapytania te zostały wykorzystane w przeszukiwaniu dwóch wspomnianych baz (Scp i WoS).

Właściwy proces przeszukiwania rozpoczęto od bazy Scopus (Scp), a w drugiej kolejności przeszukiwana była baza Web of Science (WoS). Proces ten przeprowadzono od 15 maja 2023 do 26 maja 2023 roku. Wraz z nim odbywało się zbieranie danych analitycznych, które oferowały obydwie bazy, co pozwoliło zgromadzić 553 artykuły.

Ponieważ przegląd literatury metodą STAR odnosi się do najnowszych publikacji dotyczących przedmiotu zagadnienia, dlatego postanowiono przeanalizować strukturę publikacji pod kątem ich roku wydania, krajów pochodzenia, autorów publikacji, typów analizowanych źródeł oraz obszarów wiedzy, do których publikacje zostały zaklasyfikowane.

Należy tu jednak dodać, że prezentowana analiza została przygotowana w ograniczeniach wynikających z oferowanych przez bazy narzędzi analitycznych i w wielu

15 W dalszej części pracy używany będzie zwrot charakteryzujący te publikacje – „środowisko”.

16 W dalszej części pracy używany będzie zwrot charakteryzujący te publikacje – „technologie”.



przypadkach ich braku kompatybilności (np. obszarów wiedzy). Z powodu duplikujących się pozycji pomiędzy tymi dwoma bazami nie można było wskazać także globalnego zestawienia przyjętych do dalszej analizy artykułów.

## 2.2. Wyniki badań bibliometrycznych

W przypadku tematyki „środowiskowej”, która już od dłuższego czasu funkcjonuje w obszarze naukowo-badawczym<sup>17</sup>, ok. 1/3 publikacji zarówno w bazach Scp, jak i WoS powstała przed 2016 rokiem. W odniesieniu do publikacji dotyczących I 4.0 jest ich nieco mniej, bo ok. 1/4, co przy założeniu, że problematyka ta pojawiła się na przełomie 2011 i 2012 roku, stanowi dość pokaźny wynik. Ponad 64% opracowań w przypadku publikacji „środowiskowych” oraz przeszło 73% publikacji „przemysłowych” są to prace względnie nowe (z ostatnich ośmiu lat) i to na nich w głównej mierze będzie opierał się przegląd konkretnych źródeł metodą STAR (tabela 2).

**Tabela 2.** Procentowy rozkład publikacji dotyczących tematyki „środowiskowej” i „technologicznej” w aspekcie PD w latach 2016–2023

	Przed 2016	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<b>Środowiskowa</b>									
<b>SCP (%)</b>	33,0	2,3	5,1	7,4	12,5	8,5	10,2	15,9	5,1
<b>WOS (%)</b>	35,7	3,2	7,1	5,6	12,7	9,5	11,1	11,1	4,0
<b>Technologiczna</b>									
<b>SCP (%)</b>	23,6	2,7	2,7	9,5	12,8	12,8	16,2	16,9	2,7
<b>WOS (%)</b>	26,9	3,2	3,2	8,6	17,2	11,8	9,7	17,2	2,2

**Źródło:** opracowanie własne.

Kraje pochodzenia autorów publikacji, dotyczących zarówno środowiskowego, jak i przemysłowego kontekstu projektowania oraz rozwoju produktów (PD), są dość różnorodne, choć należy obiektywnie stwierdzić, że pokazują one obecne trendy naukowo-badawcze. Sumarycznie w zestawieniu pojawiło się 45 różnych krajów, z czego w bazie Scp było to 35 w kontekście środowiskowym i 31 w kontekście przemysłowym. W przypadku bazy WoS wyniki te wynoszą odpowiednio 29 – środowisko i 30 – przemysł.

W każdym przypadku, niezależnie od kontekstu oraz przeszukiwanej bazy danych, dominują naukowcy z Chin, którzy są autorami od ok. 16% publikacji do prawie 28% (tabela 3).

<sup>17</sup> Milenijne cele zrównoważonego rozwoju zostały zdefiniowane w 2000 roku, a ich modyfikacja do ostatecznej formy, czyli obowiązujących 17 celów, została ostatecznie zaakceptowana w 2015 roku.

Tabela 3. Procentowy rozkład krajów pochodzenia autorów publikacji oraz źródeł publikacji

Kraj pochodzenia autorów publikacji														
Środowisko														
SCP (%)	Chiny	USA	Tajwan	GB	Brazylia	Włochy	Indie	Holandia	Niemcy	Kanada	Francja	Szwecja	Turcja	Inne
	18,9	9,7	9,7	7,9	4,8	4,8	3,5	3,5	3,1	2,6	2,2	2,2	1,8	25,1
WOS (%)	Chiny	Tajwan	GB	USA	Niemcy	Brazylia	Indie	Włochy	Holandia	Inne				
	27,7	11,6	9,7	9,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	19,4				
Technologie														
SCP (%)	Chiny	Niemcy	Indie	Brazylia	Australia	Polska	Włochy	Francja	USA	GB	Kanada	Tajwan	Inne	
	21,8	12,4	8,2	7,6	5,3	5,3	4,7	4,7	4,1	2,9	2,4	1,8	18,8	
WOS (%)	Chiny	Niemcy	Indie	USA	Brazylia	Australia	GB	Włochy	Polska	Francja	Kanada	Holandia	Turcja	Inne
	15,9	14,2	8,0	7,1	7,1	7,1	4,4	4,4	4,4	3,5	2,7	1,8	1,8	18,6
Struktura typu źródeł publikacji														
Środowisko														
	Artykuły	Materiały konferencyjne	Recenzje artykułów i materiałów konferencyjnych	Rozdziały książek	Materiały redakcyjne	Materiały typu „Early Access”	Inne							
SCP (%)	65,2	25,8	2,8	3,9	0,6	0,0	1,7							
WOS (%)	68,0	22,7	4,7	2,0	0,7	2,0	0,0							
Technologie														
SCP (%)	56,7	34,7	5,3	2,7	0,7	0,0	0,0							
WOS (%)	49,0	40,2	5,9	1,0	2,9	1,0	0,0							

Źródło: opracowanie własne.

W dalszej kolejności są Stany Zjednoczone oraz kraje Unii Europejskiej, wśród których dominują Niemcy, Włochy, Francja, Holandia oraz Szwecja. W zestawieniu można znaleźć także Wielką Brytanię i Polskę. Z państw spoza kontynentu europejskiego na wysokich pozycjach lokują się Taiwan, Indie, Brazylia, Australia, a także Kanada i Turcja. Pojawiają się także autorzy z dość egzotycznych krajów takich jak Sri Lanka, Egipt czy też Kolumbia.

Ponieważ prezentowanie rozkładu publikacji dla wszystkich czterech grup (przeszukiwane bazy oraz konteksty środowiskowy i przemysłowy) byłoby mało czytelne, dlatego postanowiono przeprowadzić analizę Pareto, odnoszącą się do kraju pochodzenia autorów publikacji oraz wspomnianych czterech grup kontekstowych.

Dzięki takiemu rozwiązaniu można zauważyć, że w przypadku środowiskowego aspektu PD bazy Scp nieco ponad 48% autorów z krajów wskazanych w tabeli 3 posiada więcej niż 80% publikacji, a w odniesieniu do bazy WoS jest to już tylko ok. 35% autorów. Jeżeli chodzi o obszar przemysłowy bazy Scp, to ok. 38% autorów z krajów zaprezentowanych w tabeli 3 posiada ponad 80% wszystkich publikacji, z kolei dla bazy WoS jest to ok. 44%.

Dokonano także analizy źródeł publikacyjnych (tabela 3). Większość publikacji stanowią artykuły, które w przypadku obszaru środowiskowego zarówno dla bazy Scp, jak i WOS przekraczają 65% wszystkich publikacji. Dla obszaru przemysłowego liczba artykułów według wszystkich źródeł stanowi ok. 50% dla obydwu baz.

Drugim ważnym źródłem publikacyjnym są materiały konferencyjne, które w przypadku obszaru środowiskowego stanowią dla baz Scp i WOS ponad 22% wszystkich pobranych do analizy publikacji, a dla obszaru przemysłowego liczba materiałów konferencyjnych wzrasta i wynosi ponad 34%.

Nieznaczny udział stanowią także recenzje artykułów oraz materiałów konferencyjnych – dla obszaru środowiskowego ponad 2,5% przy ponad 5% dla obszaru przemysłowego. Należy także wziąć pod uwagę rozdziały książek, które dla obydwu obszarów i baz mają ok. 2%, a w przypadku obszaru przemysłowego i bazy WoS nawet 1%. Reszta źródeł, do których można zaliczyć materiały redakcyjne, książki, artykuły typu *Early Access*, badania pilotażowe, erraty oraz materiały wycofane, to praktycznie pojedyncze przypadki – procentowo są to wartości pomijalne, choć będą one brane pod uwagę w selekcji konkretnych publikacji.

Ostatnia analiza dotyczy obszarów tematycznych publikacji, których można wskazać kilka podczas zgłaszania publikacji do baz Scp i WoS. Pierwszy z problemów, który się pojawia przy tej okazji, to brak jednorodności w nazewnictwie obszarów. W przypadku bazy WoS obszary tematyczne są znacznie bardziej uszczegółowione aniżeli w bazie Scp. Najlepiej widać to na podstawie obszaru nazwanego inżynieria (*Engineering*), który w bazie Scp występuje jako pojedynczy obszar, z kolei baza WoS dywersyfikuje go na obszary, np. nauki inżynierskie (*Engineering Science*), inżynieria przemysłowa (*Engineering Industrial*), inżynieria wytwarzania (*Engineering Manufacturing*). Podobnie wygląda to w odniesieniu do nauk o środowisku (*Environmental Science* – baza Scp), które w bazie WoS przyjmują opcje nauk, studiów, zielonego zrównoważonego rozwoju czy też inżynierii środowiskowej.

Analizę tej grupy publikacji rozpoczęto od obszaru środowiskowego PD, co zostało zaprezentowane w tabeli 4.

Wykorzystując do analizy metodę Pareto, stwierdzono, że najwięcej publikacji w tym obszarze w bazie Scp stanowią kategorie związane z inżynierią, naukami o środowisku, biznesem, zarządzaniem i rachunkowością, naukami o technologiach komputerowych, energią oraz naukami społecznymi. Oznacza to, że 40% kategorii tematycznych kumuluje w sobie ponad 80% wszystkich zidentyfikowanych w ramach bazy Scp publikacji.

W przypadku analizy tego samego obszaru, ale wg bazy WoS, zdecydowanie mniej kategorii odpowiada za 80% wszystkich publikacji, bo są to tylko trzy kategorie, z czego dwie wyraźnie dominują (mają ponad 30% publikacji) – są to ogólnie ujęta inżynieria (wg bazy WoS: nauki inżynierskie, inżynieria przemysłowa, wytwarzania, elektryczna i elektroniczna, multidyscyplinarna, mechaniczna, chemiczna, cywilna, środowiskowa oraz automatyczne systemy kontroli i robotyka) oraz nauki środowiskowe (wg bazy WoS: nauki środowiskowe, studia środowiskowe, nauki o zielonej i zrównoważonej technologii). Ostatnią kategorię stanowią zarządzanie, biznes i nauki o badaniach operacyjnych w zarządzaniu. W tym wypadku niespełna 18% kategorii tematycznych odpowiada za ponad 80% wszystkich publikacji. Podobną analizę wykonano w kontekście obszaru technologicznego dla obydwu baz (tabela 5).

Tabela 4. Kategorie naukowe aspektów środowiskowych PD publikacji

Obszary wiedzy wg SCP	Inżynieria	Nauki o środowisku	Biznes, zarządzanie i rachunkowość	Nauki o technologiach komputerowych	Energia	Nauki społeczne	Nauki o podejmowaniu decyzji i matematyka	Inne
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SCP_PDsg_CE	20	14	11	9	13	5	3	-
SCP_PDsg_SD	4	3	3	6	-	-	1	-
SCP_GPDsg	36	23	8	16	6	10	13	-
SCP_PDVlp_CE	6	5	5	3	3	-	5	-
SCP_PDVlp_SD	3	-	-	1	-	-	1	-
SCP_GPDvlp	24	33	26	9	20	16	3	-
Suma	93	78	53	44	42	31	26	54
Udział %	22,1	18,5	12,6	10,5	10,0	7,4	6,2	12,8
Udział % skumulowany	0,0	22,1	40,6	53,2	63,7	73,6	81,0	87,2
Udział % skumulowany	0,0	33,7	65,0	83,3	90,0	90,3	90,7	91,7
Udział %	33,7	31,3	18,3	6,7	0,3	0,3	1,0	8,3
Suma	101	94	55	20	1	1	3	25
WOS_PDsg_CE	18	28	-	1	-	-	-	-
WOS_PDsg_SD	5	3	6	3	-	-	-	-
WOS_GPDsg	30	26	14	12	1	-	3	-
WOS_PDVlp_CE	6	7	6	2	-	-	-	-

Tabela 4 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
WOS_PDvlp_SD	2	1	4	-	-	1	-	-
WOS_GPDvlp	40	29	25	2	-	-	-	-
Obszary wiedzy wg WOS	Nauki inżynierskie, inżynieria przemysłowa, wytwarzania, elektryczna i elektroniczna, multimedialna, mechaniczna, cywilna, chemiczna, środowiskowa, automatyczne systemy kontroli, robotyka	Nauki o środowisku, studia środowiskowe, nauki o zielonej i zrównoważonej technologii	Zarządzanie, biznes, nauki o badaniach operacyjnych w zarządzaniu	Nauki o technologiach komputerowych, systemy informatyczne, sztuczna inteligencja, aplikacje interdyscyplinarne, cybernetyka, telekomunikacja	Energia i paliwa	Nauki społeczne, psychologia stosowana, interdyscyplinarne nauki społeczne	Statystyka, probablistyka, matematyka, badania operacyjne	Inne

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Kategorie naukowe aspektów technologicznych PD publikacji

Obszary wiedzy wg Scp	Nauki o technologiach komputerowych	Inżynieria	Nauki o podejmowaniu decyzji i matematyka	Biznes, zarządzanie i rachunkowość	Nauki społeczne	Nauki o materiałach	Inne
1	2	3	4	5	6	7	8
SCP_PDsg_AI	15	13	11	3	6	1	5
SCP_PDsg_I4.0	7	7	3	3	-	-	6
SCP_PDsg_IoT	7	6	2	-	-	1	3
SCP_PDsg_VR	25	22	14	1	2	3	4
SCP_PDvlp_AI	6	7	3	1	-	3	7
SCP_PDvlp_I4.0	16	18	12	11	4	2	7
SCP_PDvlp_IoT	3	2	2	1	1	-	3
SCP_PDvlp_VR	14	17	7	3	1	2	3
Suma	93	92	54	23	14	12	38
Udział %	28,5	28,2	16,6	7,1	4,3	3,7	11,7
Udział % skumulowany	0,0	28,5	56,7	73,3	80,4	84,7	88,3
Udział % skumulowany	0,0	44,0	75,0	84,8	87,5	89,7	91,8
Udział %	44,0	31,0	9,8	2,7	2,2	2,2	8,2
Suma	81	57	18	5	4	4	15
WOS_PDsg_AI	3	1	-	4	1	-	2
WOS_PDsg_I4.0	10	2	-	1	-	1	1



Tabela 5 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
WOS_PDsg_IoT	4	5	-	-	1	-	1
WOS_PDsg_VR	18	27	2	-	-	-	0
WOS_PDvlp_AI	3	3	2	-	-	1	6
WOS_PDvlp_I4.0	23	8	12	-	2	-	4
WOS_PDvlp_IoT	1	2	-	-	-	1	1
WOS_PDvlp_VR	19	9	2	-	-	1	0
Obszary wiedzy wg WoS	Nauki inżynierskie, inżynieria przemysłowa, wytwarzania, elektryczna i elektroniczna, multidyscyplinarna, mechaniczna, cywilna, chemiczna, środowiskowa, automatyczne systemy kontroli, robotyka	Nauki o technologiach komputerowych, systemy informatyczne, sztuczna inteligencja, aplikacje interdiscyplinarne, cybernetyka, telekomunikacja	Zarządzanie, biznes, nauki o badaniach operacyjnych w zarządzaniu	Nauki o środowisku, studia środowiskowe, nauki o zielonej i zrównoważonej technologii	Statystyka, probabli- styka, ma- tematyka, badania operacyjne	Chemia analityczna i multidyscy- plinarna	Inne

Źródło: opracowanie własne.

Jak widać na podstawie tabeli 5, jeśli przeanalizować obszary wiedzy w bazie WoS, to następuje zamiana pozycjami szeroko rozumianej inżynierii z naukami o technologiach komputerowych. Wszystkie obszary inżynieryjne stanowią 44% całości publikacji, a nauki o technologiach komputerowych – 31%. W tym wypadku reguła Pareto sprawdza się idealnie, ponieważ do grupy ważnych kategorii naukowych dołączają także zarządzanie, biznes, nauki o badaniach operacyjnych w zarządzaniu, co daje w sumie 3 z 15 kategorii, stanowiące 20% wszystkich obszarów wiedzy.

Aby usunąć zduplikowane elementy, wykorzystano narzędzia informatyczne (program EndNote – informatyczne narzędzie do zarządzania referencjami), co pozwoliło pozostawić 351 pozycji (tabela 6).

**Tabela 6.** Zestawienie liczby zidentyfikowanych pozycji według zapytań w bazach Scopus i WOS

Liczba publikacji w bazie SCP	Zapytanie	Liczba publikacji w bazie WOS
11	PD&CE	19
7	PD&SD	6
61	GPD	11
4	PDvlp&CE	10
1	PDvlp&SD	3
22	GPDvlp	37
<b>106</b>	<b>Suma 192</b>	<b>86</b>
5	PD&I 4.0	7
20	PD&AI	0
34	PD&VR	2
8	PD&IoT	1
12	PDvlp&I 4.0	19
13	PDvlp&AI	5
23	PDvlp&VR	5
4	PDvlp&IoT	1
<b>119</b>	<b>Suma 159</b>	<b>40</b>

**Źródło:** opracowanie własne.

Ponieważ program EndNote w swojej funkcjonalności usuwał wyłącznie identyczne rekordy (każdy element rekordu bibliograficznego musiał być taki sam), to po wstępnej redukcji duplikatów pozostały 484 pozycje (zidentyfikowano 69 duplikatów), co okazało się niewystarczające. Z tego powodu kolejnym krokiem była ręczna weryfikacja duplikatów, która pozwoliła odnaleźć jeszcze 133 zduplikowane pozycje publikacyjne, co ostatecznie zamknęło liczbę artykułów na poziomie 351.

W ten sposób w obszarze środowiskowym do weryfikacji pozostało 106 artykułów w ramach bazy Scp oraz 86 artykułów z bazy WoS, co dało w sumie do analizy 192 pozycje. W przypadku obszaru przemysłowego w bazie Scp zidentyfikowano 119 pozycji przy 40 pozycjach w bazie WoS. Sumarycznie zamknęło to liczbę publikacji na poziomie 159.

Po przedstawieniu ogólnej analizy zebranych publikacji następuje przejście do analizy wyników badań literaturowych, aspektów środowiskowych oraz technologicznych PD, co zostanie zaprezentowane w kolejnych rozdziałach.

### 2.3. Analiza wyników badań literaturowych aspektów środowiskowych w PD

Tak przygotowana baza danych stała się punktem wyjścia do kolejnego etapu, tzn. przeszukiwania i selekcji artykułów pod kątem ich jakości i adekwatności do tematu, którego ostatecznym etapem będzie wybór publikacji podlegających dalszej analizie. Aby zachować czytelność prezentowanego opracowania, postanowiono etap ten realizować w każdym z podrozdziałów oddzielnie w ramach wyodrębnionych obszarów – środowiskowego i przemysłowego.

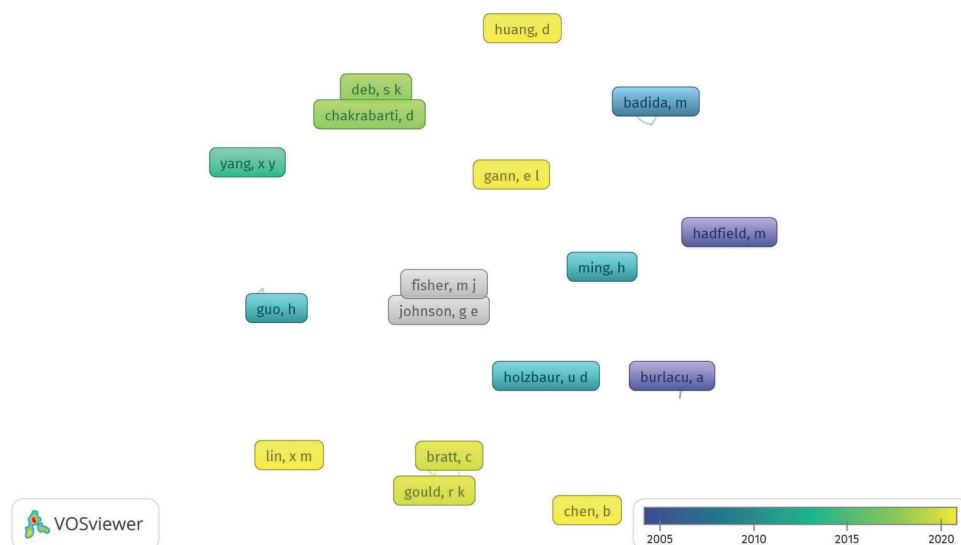
Jak zaprezentowano w wynikach badań dotyczących przeglądu literatury metodą STAR, w ramach obszaru środowiskowego zidentyfikowano:

- 17 publikacji odnoszących się do projektowania i rozwoju produktu (PD) oraz zrównoważonego rozwoju (PD&SD oraz PDvlp&SD),
- 44 publikacje dotyczące PD oraz gospodarki o obiegu zamkniętym (PD&CE oraz PDvlpCE),
- 131 publikacji na temat zielonego projektowania i rozwoju produktu (*Green Product Development* – GPD) z kwerendą (GPD&GDvlp).

W celu zaprezentowania struktury współautorstwa oraz słów kluczowych występujących w poszczególnych przeszukiwanych kategoriach posłużono się otwartym programem VOSviewer zaprojektowanym przez dwóch holenderskich naukowców – van Ecka oraz Waltmana<sup>18</sup>.

18 N. van Eck, L. Waltman, *Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping*, „Scientometrics” 2010, vol. 84, s. 523–538.

W przypadku zagadnienia PD opisywanego w kontekście zrównoważonego rozwoju kwestia współautorstwa analizowanego metodą całkowitego liczenia (każde połączenie współautorów ma jednakową wagę), przy wyłączeniu publikacji posiadających więcej niż 25 autorów na jedną publikację i minimalnej liczbie dokumentów autora równej 1, przy pomocy narzędzia VOSviewer zidentyfikowano 14 klastrow – zbiorów połączeń współautorskich, z których największy posiada cztery połączenia (3 klastry), pozostałe trzy połączenia (3 klastry) i dwa połączenia (7 klastrow) oraz jedna publikacja jest bez połączeń. Analiza pozwoliła także określić przedział czasu, w którym ukazywały się analizowane publikacje (rysunek 14).



**Rysunek 14.** Wizualizacja *Overlay* współautorów publikacji odnoszących się do tematyki PD w kontekście SD

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

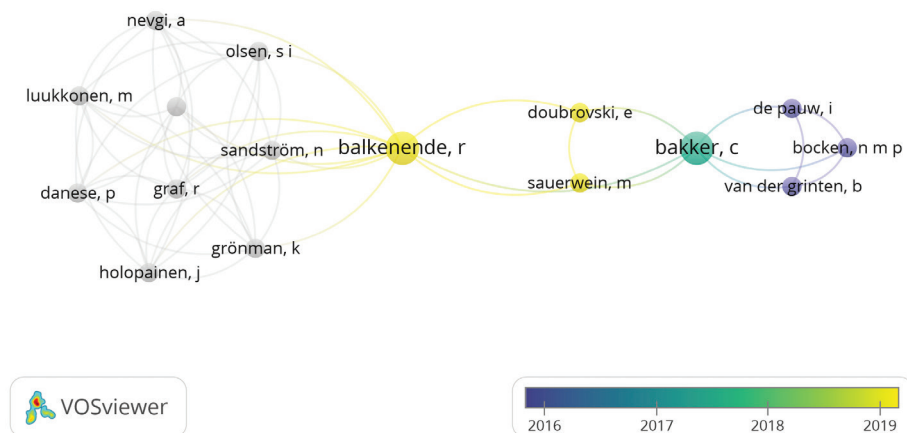
W podobny sposób przeanalizowano współwystępowanie słów kluczowych. Minimalna liczba ich wystąpień została ustalona na poziomie 3, co przy 41 analizowanych słowach kluczowych pozwoliło zidentyfikować tylko jeden klaster składający się ze słów: „zrównoważony rozwój”, „projektowanie produktu” oraz „planowanie”. Zakres czasowy zidentyfikowanych słów kluczowych był od 2016 do 2018 roku. Zmiana liczby ich wystąpień na 2 pozwoliła w ramach jednego klastra dołożyć słowo kluczowe „rozwój produktu”.

W tym miejscu należy dodać, że pozostałe analizy zostały wykonane wg identycznych warunków brzegowych, tzn.:

- dla analizy współautorskiej:
  - wyłączenie publikacji posiadających powyżej 25 współautorów,
  - minimalna liczba publikacji autora 1,
  - pełna metoda liczenia;

- dla analizy współwystępowania słów kluczowych:
  - minimalna liczba wystąpień słów kluczowych 3.

Drugie z opisywanych zagadnień dotyczyło kwestii PD w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym. Analiza współautorstwa pozwoliła zidentyfikować 36 klastrów, z czego 4 klastry stanowiły publikacje jednoautorskie. Klastry z największą liczbą połączeń współautorskich zostały przedstawione na rysunku 15.



**Rysunek 15.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE

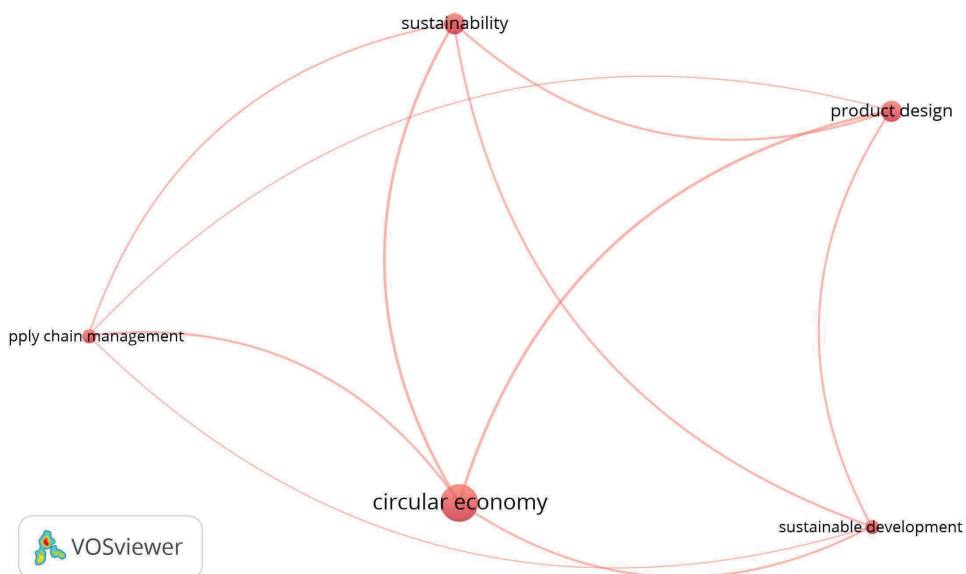
**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Druga analiza PD&CE dotyczyła kwestii słów kluczowych. Pozwoliła ona zidentyfikować jeden pięcioelementowy klaster zawierający w sobie słowa: „gospodarka o obiegu zamkniętym” (*Circular Economy*), „zrównoważony rozwój” (*Sustainable Development* oraz *Sustainability*), „projektowanie produktu” (*Product Design*) oraz „zarządzanie łańcuchem dostaw” (*Supply Chain Management*) (rysunek 16).

Zaprezentowane analizy nie pokazują całkowitych możliwości programu VOSviewer. Jak stwierdzają jego autorzy, narzędzie to najlepiej sprawdza się w przypadku baz składających się z minimum 100 obiektów, ponieważ większość programów dostępnych dla naukowców nie najlepiej wizualizuje mapy połączeń<sup>19</sup>. Dlatego efekty działania programu powinny być lepiej widoczne dla ostatniej analizowanej grupy, a więc zielonego PD.

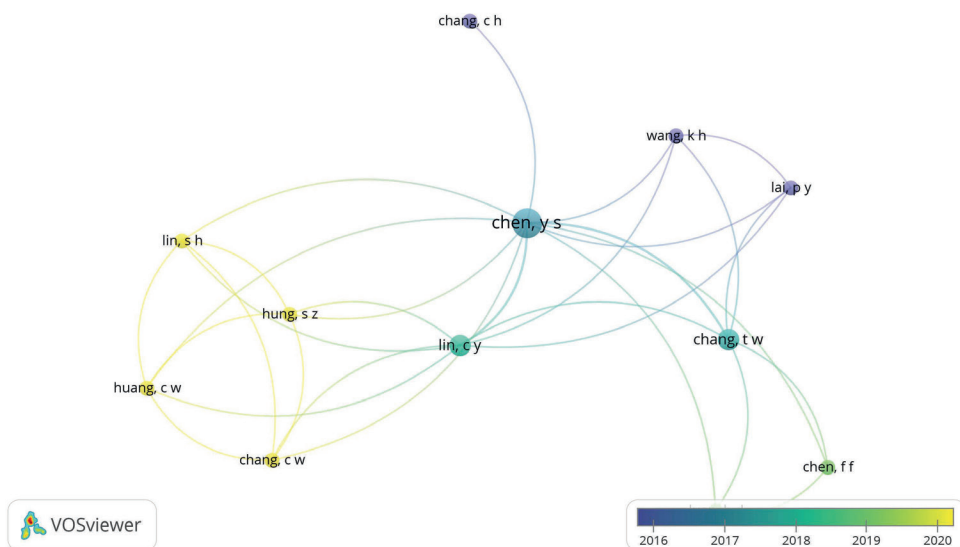
Ostatnia z analizowanych grup środowiskowych odnosiła się do zielonego projektowania i rozwoju produktu. Pierwsze badanie, podobnie jak poprzednie, dotyczyło współautorstwa publikacyjnego. Ponieważ wykres spełniający kryteria wyszukiwania zawierał 248 autorów, tworzących 72 klastry, dlatego zdecydowano się na zaprezentowanie najdłuższej sieci połączeń zawierającej 12 elementów (rysunek 17).

19 Tamże, s. 524.



**Rysunek 16.** Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

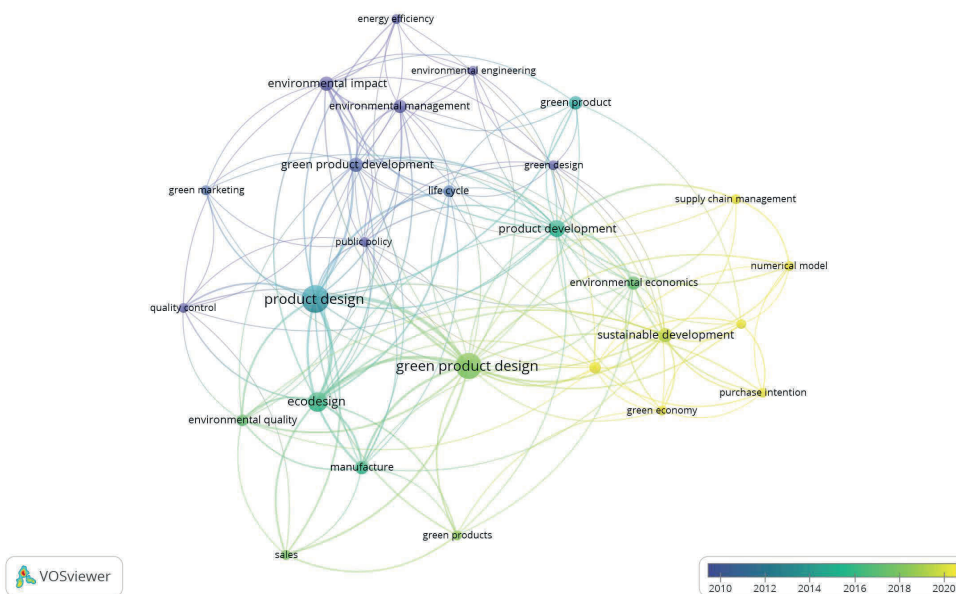


**Rysunek 17.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Jak widać z rysunku 17, współautorstwa zdominowane są przez azjatyckich autorów, a zakres czasowy publikacji rozciąga się od roku 2016 do 2020.

Analiza słów kluczowych pozwoliła zidentyfikować cztery klastry zawierające wspólnie 27 elementów. Ich wyraźnie zarysowany podział wskazuje na zmiany podejścia publikacji w czasie od sfery operacyjnej w latach 2010–2014 („inżynieria środowiskowa” – *Environmental Engineering*, „zielony marketing” – *Green marketing*, „efektywność energetyczna” – *Energy Efficiency*, „wpływ środowiskowy” – *Environmental Impact*) do sfery strategicznej w okresie 2018–2020 („podejście strategiczne” – *Strategic Approach*, „zielona ekonomia” – *Green Economy*, „ekonomia środowiskowa” – *Environmental Economy*) czy też modeli numerycznych (*Numerical Model*) (rysunek 18).



**Rysunek 18.** Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście Green

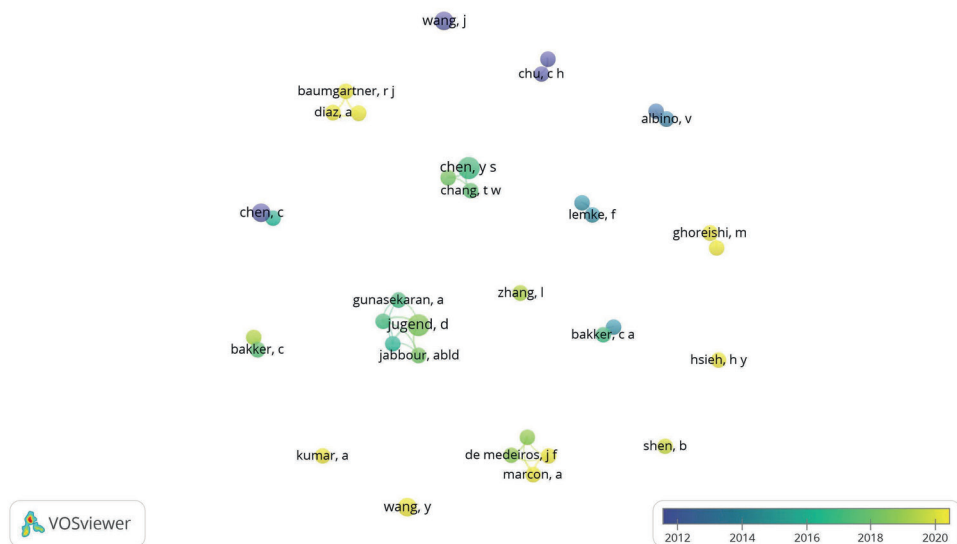
**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Na samym końcu postanowiono przeanalizować wspólnie wszystkie publikacje dotyczące projektowania i rozwoju produktu (PD) w kontekstach CE, SD oraz GPD. Sumaryczna liczba autorów tych opracowań wyniosła 413. Założono, że do analizy minimalna liczba autorów na dokument to trzech badaczy. W ten sposób pięciu autorów przekroczyło ustanowiony próg, a są nimi C. Chen, Y.S. Chen, D. Jugend, J. Wang, Y. Wang.

Należy zwrócić uwagę, że występuje tutaj zaledwie piątka autorów, ponieważ w stworzonej bazie danych jeden został mylnie przypisany jako IEEE (IEEE Xplore

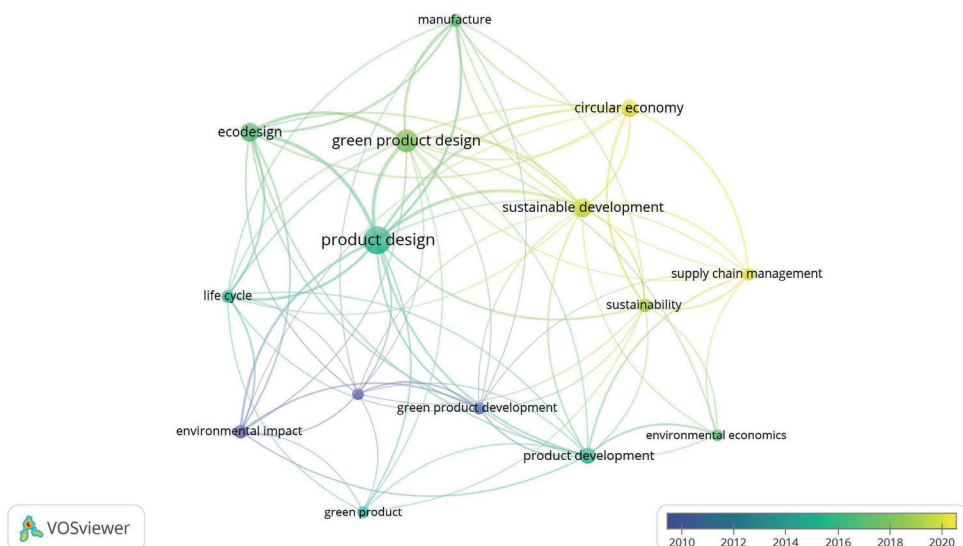


– baza danych publikacji, głównie inżynierskich, *Advancing Technology for Humanity*). Kiedy zmniejszamy liczbę autorów do dwóch, okazuje się, że 36 badaczy przekroczyło próg, tworząc 17 klastrow, z których najliczniejszy wynosił pięciu autorów (rysunek 19).



**Rysunek 19.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach wszystkich publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE, SD, GPD – dwóch autorów  
**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Jeśli chodzi o słowa kluczowe, to w sumie wyodrębniono ich 437. Przyjęto, że minimalna liczba wystąpień słów wynosi 5, co pozwoliło wyodrębnić 15 słów, które przekroczyły ustalony próg (w przypadku obniżenia liczby wystąpień do 4 można wskazać 18 słów kluczowych). Do wyodrębnionych słów lub fraz kluczowych zaliczono (od największej liczby wystąpień): „projektowanie produktu” (*Product Design*), „ekoprojekt” (*Ecodesign*), „zielone projektowanie produktu” (*Green Product Design*), „zrównoważony rozwój” (*Sustainable Development, Sustainability*), „gospodarka o obiegu zamkniętym” (*Circular Economy*), „wytwarzanie” (*Manufacture*), „wpływ środowiskowy” (*Environmental Impact*), „rozwój produktu” (*Product Development*), „cykl życia” (*Life Cycle*), „zielony rozwój produktu” (*Green Product Development*), „zarządzanie środowiskowe” (*Environmental Management*), „zarządzanie łańcuchem dostaw” (*Supply Chain Management*), „ekonomia środowiskowa” (*Environmental Economics*), „zielony produkt” (*Green Product*) (rysunek 20).



**Rysunek 20.** Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście Green, CE oraz SD

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

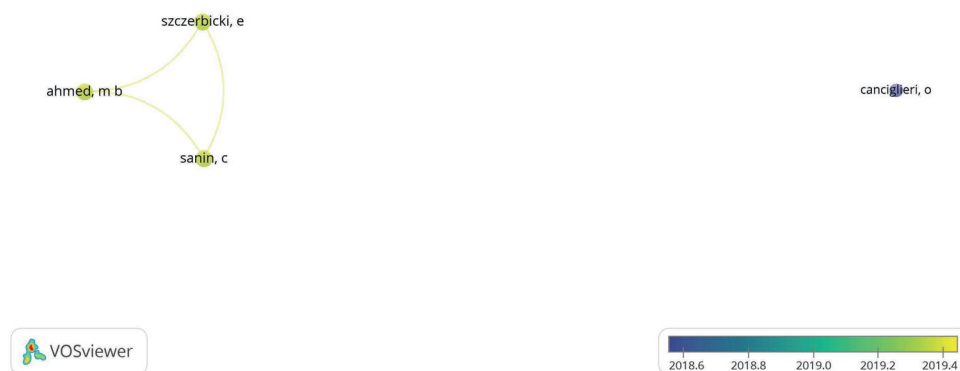
Jak widać z prezentowanych wyników badań literaturowych, szczególnie tych kumulujących wszystkie publikacje, tematyka słów kluczowych zmienia się od „wpływu środowiskowego” do „zrównoważonego rozwoju”, „ekonomii o obiegu zamkniętym” czy też „ekonomii środowiskowej”. Wynika z tego, że tematyka PD uwzględniająca kwestie środowiskowe wciąż ewaluje, w coraz większym zakresie, wpływając na procesy PD. Równie ciekawie może zapowiadać się analiza literaturowa, odnosząca się do najnowszych trendów związanych z technologiami i bazujących na założeniach czwartej rewolucji przemysłowej. Te kwestie zostaną poruszone w kolejnym podrozdziale.

## 2.4. Analiza wyników badań literaturowych aspektów technologicznych w PD

Drugi z obszarów podlegający bibliometrycznej analizie literaturowej to projektowanie i rozwój produktu (PD), łączy się on z pojęciem Industry 4.0 oraz wybranymi technologiami I 4.0. W pierwszej kolejności postanowiono przeanalizować literaturę związaną z samym pojęciem I 4.0 w kontekście PD.

Wyraźnie daje się zauważyć, że nie ma zbyt wielu współautorstw publikacji na ten temat. Przyjmując za minimalną liczbę autorów w dokumencie dwóch badaczy,

wyodrębnia się ze 149 nazwisk tylko pięć rekordów (Ahmed, Sanin, Szczerbicki, Canciglieri), z czego – podobnie jak w aspekcie środowiskowym – pojawia się także jako nazwisko baza danych IEEE, która została z analizy usunięta (rysunek 21).



**Rysunek 21.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

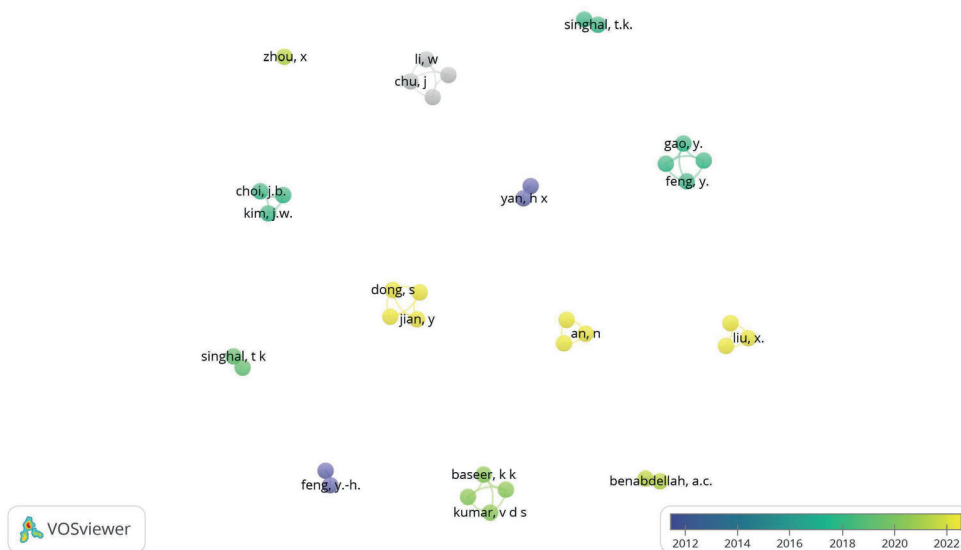
Jeśli chodzi o słowa kluczowe, to wyodrębniono ich w sumie 42. Przyjmując minimalną liczbę wystąpień słów na poziomie dwa, wśród publikacji wskazano tylko jeden klaster z trzema słowami: „Industry 4.0”, „rozwój nowego produktu” (*New Product Development* – NPĐ) oraz „projektowanie produktu”. Zakres czasowy publikacji ze wskazanymi słowami kluczowymi wynosi trzy lata, a więc od roku 2019 (w przypadku NPĐ) do 2021 (w przypadku projektowania produktu – *Product Design*).

Kolejnym z badanych aspektów był obszar Internetu Rzeczy (IoT). Ponieważ był to obszar najmniejszy, jeśli chodzi o liczebność publikacji (13 pozycji), przyjęto jako minimalną liczbę autorów na dokument jeden, co pozwoliło wyodrębnić 36 autorów. Największa liczba współautorów jednej pozycji wynosiła cztery i odnosiła się ona do czterech pozycji. Wśród wszystkich autorów widać wyraźną dominację badaczy azjatyckich. Kwestia IoT w PD podnoszona była już od 2012 roku, co zostało zaprezentowane na rysunku 22.

Niewiele ciekawiej przy tak nikłej liczbie publikacji wygląda kwestia słów kluczowych, których wyodrębniono w sumie 65. Po przyjęciu minimalnej liczby wystąpień słów na poziomie dwa okazało się, że wyodrębniono dwa klastry (jeden z trzema pozycjami, drugi z jedną), w których jedno słowo dotyczyło projektowania produktu, a pozostałe trzy były różnym zapisem IoT (*Internet of Things*, *Internet of Things [IoT]*, *Internet of Things Technology*).

Kolejne z omawianych w ramach analizy literaturowej zagadnień odnosiło się do kwestii wirtualnej rzeczywistości (VR). W poddanych analizie pozycjach wyodrębniono 181 autorów, w przypadku siedmiu opracowań przekroczono próg dwóch

autorów na publikację. W ten sposób wyodrębniono pięć klastrow, z czego dwa liczyły po dwóch autorów, a trzy stanowili pojedynczy autorzy. Rozpiętość czasowa analizowanych w ramach klastrow publikacji była od 2008 do 2014 roku. Widać zatem wyraźnie, że tematyka badań VR połączonego z PD nie generuje jeszcze szerszych powiązań autorskich.

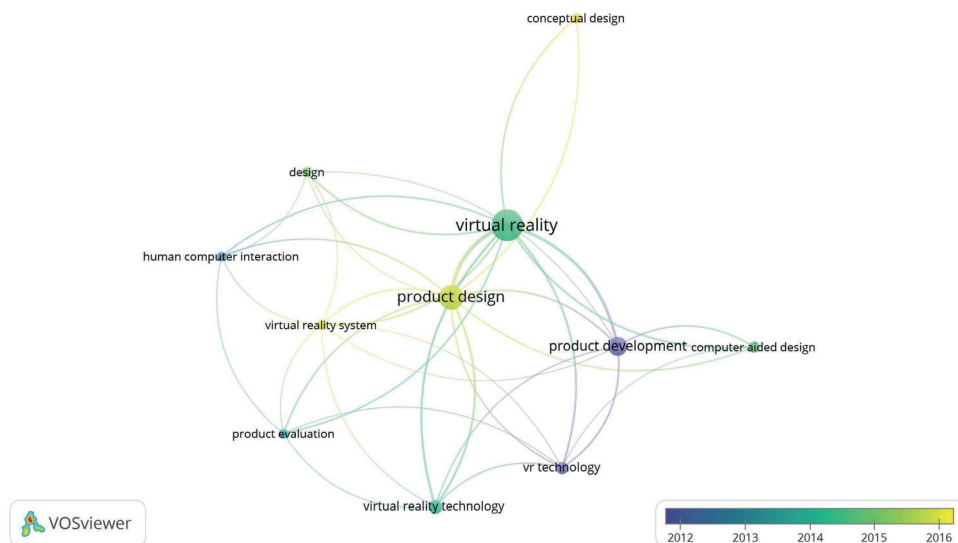


**Rysunek 22.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście IoT

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Jeśli chodzi o słowa kluczowe, przy minimalnej liczbie występujących słów kluczowych na poziomie trzy z 230 słów 11 przekroczyło ustalony próg. Do tej grupy zaliczono: „projektowanie”, „projektowanie wyrobu” i „rozwój wyrobu”, „wirtualną rzeczywistość” (*Virtual Reality*, *Virtual Reality Technology*, *VR Technology*), „system wirtualnej rzeczywistości” (*Virtual Reality System*), „komputerowe wspomaganie projektowania” (*CAD*), „ocenę produktu” (*Product Evaluation*), „interakcję pomiędzy człowiekiem a komputerem” (*Human Computer Interaction*) i „projektowanie koncepcyjne” (*Conceptual Design*) (rysunek 23).

Ostatnia z przeprowadzanych analiz (poza analizą sumaryczną) odnosiła się do kwestii sztucznej inteligencji (AI). W pierwszej kolejności analizie poddano autorstwa i współautorstwa, co pozwoliło wyodrębnić 101 autorów, a przy założeniu minimum jednego autora na dokument powstało 38 grup z maksymalną liczbą siedmiu nazwisk (rysunek 24). Przy tak wyodrębnionym zakresie pierwsze publikacje powstawały już od 2005 roku, ale warto zauważyć, że dominujący na wykresie kolor żółty pokazuje, że dość spora liczba opracowań pojawiła się bliżej roku 2020.



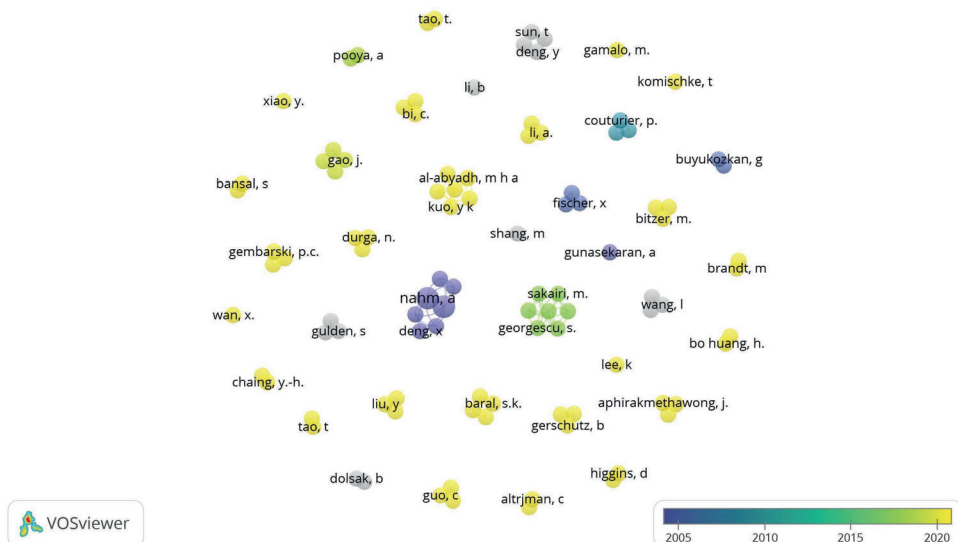
**Rysunek 23.** Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście VR

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Analiza słów kluczowych pozwoliła otrzymać 141 rekordów. Przyjmując jako minimalną liczbę wystąpień słowa kluczowego na poziomie cztery, udało się zidentyfikować cztery takie wystąpienia, które utworzyły dwie grupy – jedną z trzema słowami („sztuczna inteligencja” – AI, „rozwój nowego produktu” – NPD oraz „rozwój produktu” – *Product Development* – PDv) oraz drugą z samym „projektowaniem produktu” (*Product Design* – PDs). Zakres czasowy wyodrębnionych w analizie publikacji wyniósł 5 lat, a więc od 2015 do 2020 roku.

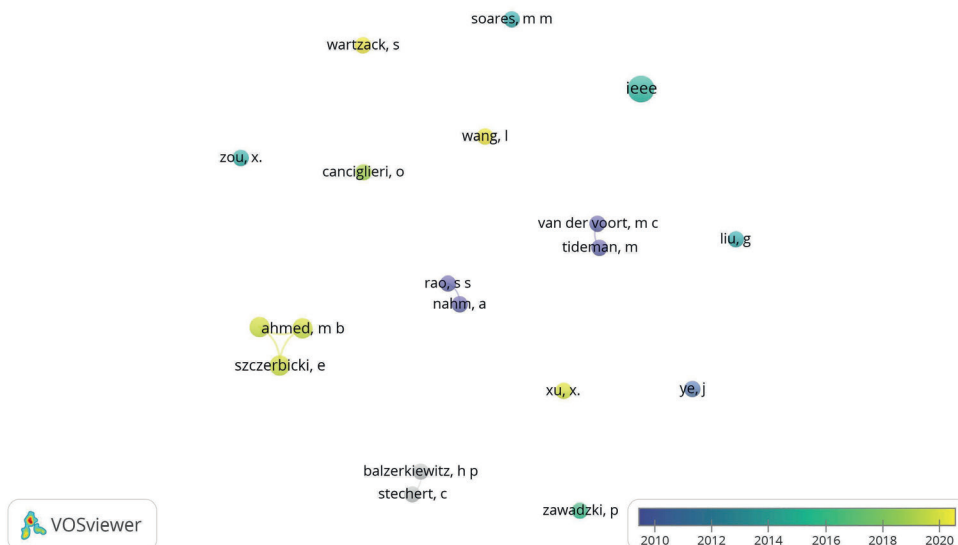
Ostatni z badanych obszarów stanowiła analiza zbiorcza wszystkich artykułów związanych z pojęciami I 4.0 i PD, a więc I 4.0, IoT, VR oraz AI. W sumie autorami artykułów było 461 osób. W ramach analizy publikacji przyjęto minimalną liczbę dokumentów autora jako dwa, co pozwoliło stworzyć 14 grup badaczy, które przekroczyły próg zapytania. Najliczniejszy i jednocześnie jedyny klaster liczył trzy nazwiska (rysunek 25).

Analizując pojawiające się we wszystkich publikacjach słowa kluczowe, przyjęto, że minimalna liczba ich wystąpień wyniesie trzy. Wśród 21 odfiltrowanych słów większość dotyczyła kwestii PD (PDs, PDv, NPD, metod projektowania – *Design Method*, badań nad projektowaniem – *Design Research*, projektowania konceptualnego), oceny produktu (*Product Evaluation*), VR, rozszerzonej rzeczywistości (AR, IoT, AI, CAD) oraz aspektów ergonomii i interakcji na linii człowiek–komputer. W ten sposób powstało pięć klastrow, z których najliczniejszy posiadał osiem słów kluczowych. Pełen zastaw opisywanych słów prezentuje rysunek 26.



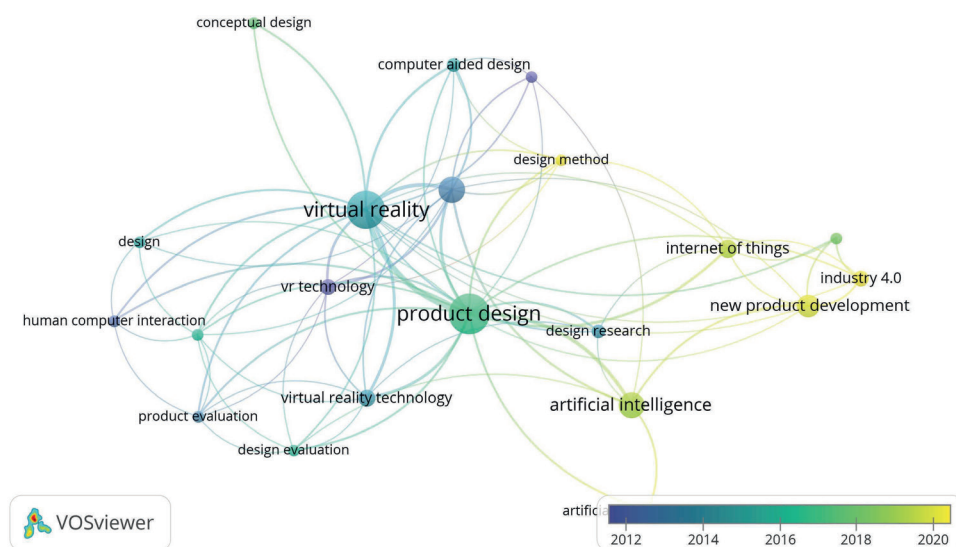
**Rysunek 24.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście AI

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.



**Rysunek 25.** Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0, IoT, VR, AI

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.



**Rysunek 26.** Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0, IoT, VR oraz AI

**Źródło:** opracowanie własne przy wykorzystaniu VOSviewer.

Zaprezentowana analiza bibliometryczna może stanowić dobrą podstawę pod wykonanie już właściwego przeglądu prezentowanych w artykułach treści. W ten sposób każdy z obszarów (środowiskowy i przemysłowy) będzie miał swoje rozwinięcie w postaci konkretnych podrozdziałów, tematycznie związanych z przeszukiwanymi kwerendami. Wybór opisywanych publikacji realizowany był pod kątem identyfikacji takich artykułów, które tworzą holistyczne podejście do zagadnień projektowania produktów 4.0 lub też mogą stanowić rozwinięcie jednego z etapów lub obszarów ich projektowania.

Dzięki zaprezentowanej analizie zauważamy zatem wielodyscyplinarność opisywanego zagadnienia, co z pewnością nie ułatwia syntezy zgromadzonej literatury. Przedstawione analizy map bibliograficznych pozwalają jednak stworzyć pewien wstępny pogląd na opisywane zagadnienie. W kolejnej części opracowania dokonany będzie przegląd treści publikacyjnych, mający na celu identyfikację głównych nurtów teoretycznych opisujących kwestie środowiskowe w PD.





## Rozdział 3

# Projektowanie i rozwój produktów w ramach obszaru środowiskowego

Nigdy jeszcze w historii ludzkość w tak drastyczny sposób nie przyczyniła się do degradacji środowiska naturalnego jak obecnie. Na naszych oczach giną gatunki, ekosystemy, zmieniają się strefy klimatyczne, a w większości przypadków odpowiada za to człowiek, który ponad wszystko pragnie mieć i posiadać. Takie podejście napędza przemysł, w którym coraz bardziej spersonalizowane produkty docierają do konsumentów w ilościach masowych. Od momentu pojawienia się drugiej rewolucji przemysłowej i jej jednego z bardziej charakterystycznych punktów, tzn. linii montażowej Forda, rynek zalewany jest masą towarów, które już na etapie projektowania są poddawane wnikliwej analizie opłacalności. Produkowane są nie tylko artykuły fizyczne, ale także rośliny i zwierzęta, często genetycznie modyfikowane na potrzeby większej wydajności. Wydaje się jednak, że ten sposób funkcjonowania gospodarek zbliża się do końca.

Powodem tego stanu rzeczy nie jest fakt refleksji nad obecną sytuacją oraz zadanie podstawowego pytania, dokąd taka działalność może prowadzić. To sama Ziemia i jej klimat wymuszają na ludziach zmiany zachowań, a co za tym idzie – zmieniają się też dotychczasowe paradygmaty biznesowe.

Aby mogły zajść takie przewartościowania, konieczne jest nowe, inne podejście do aspektów projektowania wyrobów, ze szczególnym uwzględnieniem kwestii środowiskowych. Cele zrównoważonego rozwoju, których osiągnięcie do 2030 roku jest poważnie zagrożone, muszą być podstawą podejmowania decyzji przez projektantów. Dzięki temu gospodarka o obiegu zamkniętym stanie się kluczowym miejscem pozyskiwania surowców i materiałów do nowo projektowanych produktów. W tym rozdziale zostanie zaprezentowany przegląd najnowszej literatury dotyczącej zagadnień projektowania i rozwoju produktu w kontekście aspektów środowiskowych.

### 3.1. Projektowanie i rozwój produktu w ramach zrównoważonego rozwoju

Pierwsze z analizowanych publikacji dotyczyły PD w aspekcie zrównoważonego rozwoju. Tytuły artykułów odnosiły się bądź to bardzo ogólnie do kwestii projektowania produktów z koncepcją zrównoważonego rozwoju, bądź to do wybranych szczegółowych procesów PD, uwzględniających zrównoważony rozwój. Nie brakuje także nawiązania do kwestii PD&SD w kontekście najnowszych technologii.

Zhang i Huang<sup>1</sup> zwrócili uwagę na to, że inteligentne technologie przemysłu 4.0 uwzględniają już w swoich założeniach takie elementy jak: oszczędność energii, redukcję dwutlenku węgla czy też szerszych celów zrównoważonego rozwoju (SDG). Można je osiągnąć – zdaniem autorów – przez zieloną transformację środowiskową. Z badań, które badacze przeprowadzili na próbie 242 mieszkańców (wskaźnik zwrotu ankiet wynosił ok. 81%) chińskiej prowincji Anhui, wynika, że najważniejszymi aspektami zrównoważonego rozwoju w kontekście PD są kwestie ekonomiczne, funkcjonujące na rynku modele biznesowe związane ze zrównoważonym rozwojem, uwzględnianie w projektowaniu produktów ich późniejszego recyklingu, wykorzystywanie krytycznych technologii w sferze badań, rozwoju i innowacji (R&D&I – *Research & Development & Innovation*) oraz szacowanie kosztów cyklu życia produktów. Wszystkie te elementy mogą stać się swoistymi drogowskazami wyznaczającymi kierunki badań i rozwoju nad projektowaniem produktów uwzględniającym kwestie zrównoważonego rozwoju.

Podobne badania w chińskiej prowincji Zhejiang przeprowadzili Xia i Lin<sup>2</sup> (wskaźnik zwrotu ankiet wynosił ok. 79%). Autorzy ci wskazali najbardziej podkreślane czynniki, do których zaliczono: uporządkowany, innowacyjny projekt funkcjonujący w ramach zintegrowanej platformy uwzględniający system środowiskowy oraz pięć najważniejszych wskaźników sukcesu, do których zaliczono:

- spójną koncepcję projektu zielonej produkcji,
- ocenę wpływu na środowisko naturalne,
- ekoefektywność,
- ekoinnowacje,
- emisje zanieczyszczeń.

1 H. Zhang, D. Huang, *Critical Success Factors in Sustainable Development of Product Design for Green Environmental Transformation*, „Journal of Environmental Protection and Ecology” 2022, vol. 23(4), s. 1551.

2 L. Xia, X. Lin, *Critical Factors in The Sustainable Development of Product Design for Eco-Innovation and Green Manufacturing*, „Journal of Environmental Protection and Ecology” 2022, vol. 23(4), s. 1536.

Zwrócono także uwagę na możliwość istnienia konfliktu pomiędzy efektywnością a efektywnością ekonomiczną w procesie podejmowania strategicznych i operacyjnych decyzji.

Z przytoczonych publikacji zatem wynika, że istnieje konieczność stworzenia modeli biznesowych uwzględniających SD, którego kluczowym elementem byłaby zintegrowana platforma projektowania innowacyjnych produktów uwzględniająca kwestie środowiskowe.

Guo i Chen zwracają także uwagę na problem sprzeczności pomiędzy realizacją celów gospodarczych przedsiębiorstw a celami środowiskowymi, wskazując na konieczność zaawansowanych prac nad zrównoważonym projektowaniem<sup>3</sup>. Ich zdaniem podstawowa struktura metody systemowego, zrównoważonego projektowania powinna być realizowana w pięciu etapach<sup>4</sup>, tzn.:

- 1) analizy strategicznej (pozyskania informacji ekonomicznych, społecznych, technologicznych i kulturowych pozwalających stworzyć wizję zrównoważonego systemu kreującego innowacje),
- 2) identyfikacji możliwości (bazuje na weryfikacji projektów charakteryzujących się innowacyjnością i zrównoważonym rozwojem, wykorzystując do tego celu wyniki poprzedniego etapu, czyli analizy strategicznej – efektem tego etapu powinno być nakreślenie planu zrównoważonego projektowania),
- 3) stworzenia koncepcji zrównoważonego systemu projektowania (wybór najbardziej obiecujących projektów poprzez wielodyscyplinarne grupy reprezentujące prototyp myślenia systemowego – kreatywność grup pozwala stworzyć ostateczne ramy konfiguracji produktów lub całych linii produktowych, a także zdefiniować priorytety uwzględniające zagrożenia środowiskowe związane z produkcją, dystrybucją i innymi fazami cyklu życia produktu),
- 4) wdrażania (ukierunkowanie na zdefiniowanie szczegółowych wymagań systemu, w tym etyki środowiskowej, społecznej i ekonomicznej, a także określenie koncepcji oceny aspektów środowiskowych, społecznych i ekonomicznych we wdrażanym systemie wraz ze szczegółowymi etapami jego wprowadzania),
- 5) komunikacji (informowanie o szczegółach realizacji projektu ze szczególnym uwzględnieniem priorytetów projektowych czy też zrównoważonych rozwiązań).

W tym samym opracowaniu wyodrębniono również diagram ramowy analizy zrównoważonego składu produktu, w skład którego wchodzi informacje dotyczące produktu w aspekcie:

3 L. Guo, B. Chen, *The Industrial Product Design Service System Based on the Sustainable Development of the Internet of Things*, „Mobile Information Systems” 2022, vol. 2022, Art. ID. 4623301, s. 1.

4 Tamże, s. 3.

- funkcji (Vargova<sup>5</sup> i inni dokonali podziału funkcji na techniczne, społeczne, kulturowe, psychologiczne i ekonomiczne),
- użytkowania,
- wytwarzania,
- wykorzystywanych materiałów,
- jego struktury,
- jego recyklingu,
- środowiskowym<sup>6</sup>.

Całość systemu wykorzystująca Internet Rzeczy pozwala zbierać informacje w holistycznym cyklu życia produktu i na tej podstawie podejmować decyzje dotyczące PD.

Kwestie SD PD omawiają także Wang i Ming<sup>7</sup>, którzy wskazują na trzy podstawowe etapy innowacyjnego projektowania produktu w ramach koncepcji SD:

- 1) opracowanie samej koncepcji,
- 2) wybór materiałów,
- 3) kontrola cyklu życia produktu.

W każdym z trzech wymienionych etapów pojawia się kwestia SD i to właśnie jej uwzględnienie stanowi właściwe wyzwanie dla całej koncepcji.

Wśród publikacji, które dotyczą omawianego zagadnienia, znaleźć można i te, które koncentrują się na kwestiach zarządzania wiedzą w procesie SD PD. Markopoulos i Gann<sup>8</sup> przedstawili demokratyczny model rozwoju produktu, uwzględniający kwestie zrównoważonego rozwoju dla dwustronnego dzielenia się wiedzą pomiędzy organizacją a jej pracownikami (rysunek 27).

Biorąc pod uwagę czynnik organizacyjny, można zauważyć przechodzenie z operacyjnych poziomów dzielenia się wiedzą wynikających z kształtowania kultury organizacyjnej danego przedsiębiorstwa do strategicznej internacjonalizacji rozwoju produktu.

Na poziomie 1 prezentowanego modelu osoby fizyczne i organizacje rozpoczynają współpracę. Kluczowym elementem jest tu podstawowe zrozumienie misji i wizji drugiej strony.

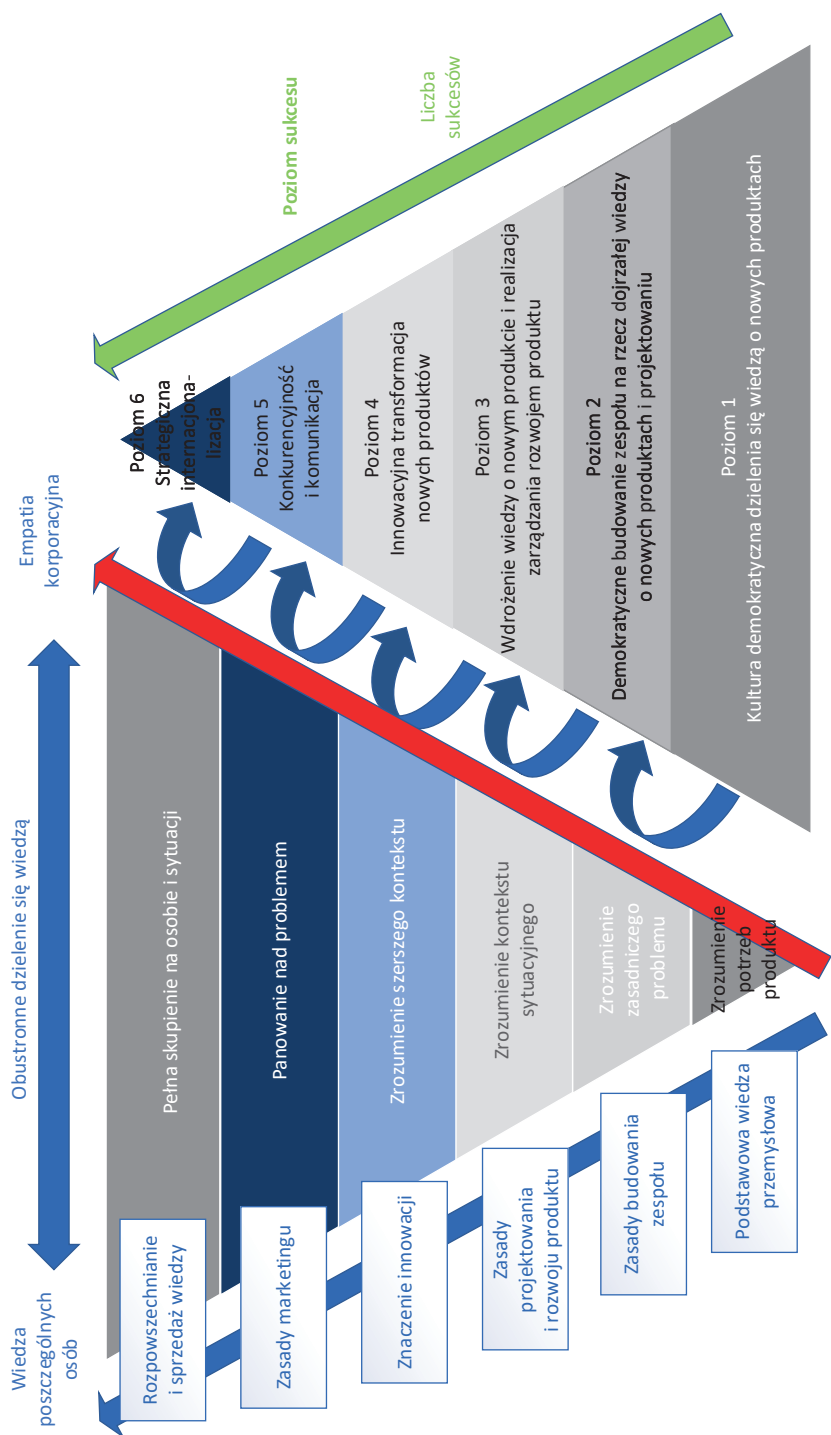
Poziom 2 odpowiada za demokratyczny proces budowania zespołu. Organizacja zapewnia na tym etapie edukację w zakresie podstawowych zasad pracy zespołowej (komunikacji, raportowania, wykorzystywanych technologii, funkcjonowania w obrębie konkretnych struktur itp.).

5 J. Vargova, M. Badida, B. Hricova, *Product Design and Sustainable Development in Engineering Process. Proceedings*, „Annals of DAAAM & Proceedings” 2008, s. 1443.

6 L. Guo, B. Chen, *The Industrial Product Design Service...*, s. 4.

7 J. Wang, H. Ming, *Reflection of Sustainable Development on Innovative Product Design*, Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference on Product Innovation and Management, Wuhan, China 2010.

8 E. Marcopoulos, E. Gann, *Bilateral Knowledge-Sharing for New Product Development Under the UN Sustainable Development Goals*, „Proceedings, Advances in Creativity, Innovation, Entrepreneurship and Communication of Design. AHFE” 2021, vol. 276, s. 88–90.



**Rysunek 27.** Model demokratycznego rozwoju produktu przy współdzieleniu się wiedzą  
**Źródło:** A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST 2021, Tanger, Maroko 2021, s. 90.

Na poziomie 3 rozwój produktu przechodzi do fazy jego konceptualizacji. W tym momencie dana osoba może nauczyć się standardowego, wewnętrznego procesu PD.

Na poziomie 4 dokonuje się analiza potencjalnego wpływu produktu na innowacyjność. Organizacja może przekazywać podstawową wiedzę branżową, rozszerzając w ten sposób zakres zrozumienia przez pracownika wartości, jaką produkt wnosi do przedsiębiorstwa. Pokazany jest tutaj także zakres wsparcia misji i wizji przedsiębiorstwa przez produkt.

Poziom 5 pozwala pracownikowi zrozumieć działanie komórki organizacyjnej marketingu, a także poznać podstawowe zasad marketingowe. W ramach bilateralności pracownik może przekazywać informacje zwrotne na temat tego, w jaki sposób rynek lokalny będzie reagował na działania marketingowe i jak będzie postrzegany przez niego produkt. Na tym etapie mogą się pojawić sugestie skutecznych i alternatywnych rozwiązań.

Ostatni poziom, czyli 6, pozwala pracownikowi zdobyć wiedzę w zakresie dystrybucji i sprzedaży. W ten sposób zamknięty zostaje holistyczny cykl edukacji w zakresie rozwoju produktu. Na tym etapie mogą pojawić się również alternatywne rozwiązania czyniące dystrybucję skuteczniejszą w określonym kontekście.

Na takim modelu szczególnie zyskują wielonarodowe korporacje, które zaczynają od lokalnego pozyskiwania wiedzy, a faktycznie oferują międzynarodowy poziom kształcenia.

Zdaniem autorów prezentowanego opracowania taki model PD wspiera następujące cele zrównoważonego rozwoju:

- SDG 1 – Zero ubóstwa (poprzez zatrudnienie nie tylko lokalnych pracowników do prac nad PD),
- SDG 4 – Jakość edukacji (poprzez bilateralność prezentowanego modelu uczestnik otrzymuje dostęp do solidnej i praktycznej edukacji biznesowej),
- SDG 8 – Godna praca i wzrost gospodarczy (wzrost wrażliwości korporacyjnej na lokalne rynki pracy pozwala lepiej zrozumieć ich specyfikę, zwiększając także szanse na rozwój pracowników oraz osiąganie wzrostu gospodarczego),
- SDG 9 – Przemysł, innowacje i infrastruktura (działanie bilateralnego systemu dzielenia się wiedzą pozwala na absorbcję innowacji w ramach krajów rozwijających się, co wspiera kwestie dywersyfikacji przemysłu i jego wzrostu).

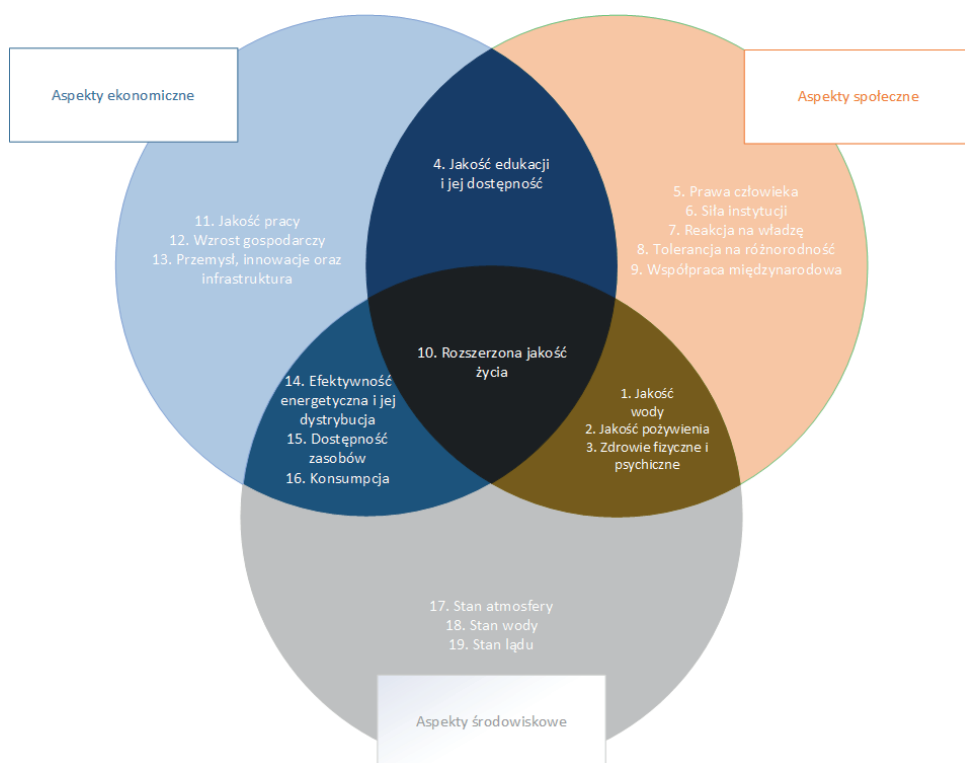
Z prezentowanej publikacji wyłania się zatem opis „miękkich” uwarunkowań zrównoważonego rozwoju związanych nie tylko fizycznie z danymi produktami, ale także i z przekazywaniem i pozyskiwaniem wiedzy czy też z edukacją.

Kwestią rozwoju produktów w kontekście SDG oraz kategoriami wpływu społecznego zajęli się Johnson i inni<sup>9</sup>. W artykule skupiono się wyłącznie na kategoriach wpływu społecznego, pomijając problem wpływu ekonomicznego oraz środowiskowego

9 G. Johnson, M. Fisher, J. Salmon, C. Mattson, *Product Development Using Perceived Correlations between The United Nations Sustainable Development Goals and Social Impact Categories*, Proceedings, 26<sup>th</sup> Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, DFMLC 2021, Held as



(koncepcja *The Triple Bottom Line* – TBL, czyli potrójny wynik końcowy; została opisana przez Elkingtona w 1994 roku<sup>10</sup>, znana jest także w formule skrótu 3P – *People, Planet, Profit*, tzn. ludzie, planeta, profity). Autorzy, chcąc uniknąć wartościowania SDG (jako pozytywne lub negatywne), zaproponowali 19 neutralnych aspektów odnoszących się do pierwotnych 17 SDG oraz do konkretnych grup TBL, co prezentuje rysunek 28.



**Rysunek 28.** Diagram Venna rozkładu aspektów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych w odniesieniu do TBL

**Źródło:** G. Johnson, M. Fisher, J. Salmon, C. Mattson, *Product Development Using Perceived Correlations between The United Nations Sustainable Development Goals and Social Impact Categories*, Proceedings, 26<sup>th</sup> Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, DFMLC 2021, Held as Part of the ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC-CIE 2021, New York, USA 2021, s. 4.

Part of the ASME, 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC-CIE 2021, New York, USA 2021.

10 J. Elkington, *Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development*, „California Management Review” 1994, vol. 36, s. 90–100.

Na tej podstawie stworzyli oni mapę korelacji, pokazującą, które z 11 kategorii wpływu społecznego (rozwarstwienie społeczne, zdrowie i bezpieczeństwo, prawa człowieka, sieci i komunikacja, przestępczość i konflikty, tożsamość kulturowa i dziedzictwo, rodzina, płeć, edukacja, płatna praca oraz zmiany populacji) oddziałują na wspomniane już 19 aspektów skategoryzowanych w obszarach społecznych, ekonomicznych i środowiskowych. Z badań wynika, że większość respondentów dostrzegała znaczące korelacje np. między zdrowiem i bezpieczeństwem, nie widząc podobnego związku pomiędzy płcią. Oprócz zdrowia i bezpieczeństwa silnie skorelowanymi kategoriami były także zmiany populacyjne. W ten sposób potwierdzono hipotezę, że zmiany wpływu społecznego są silnie powiązane z gospodarką i środowiskiem.

Z kolei Holzbaur zwraca uwagę na potencjalny konflikt pomiędzy zrównoważonym rozwojem (SD) a projektowaniem i rozwojem produktu (PD)<sup>11</sup>. Zdaniem autora bierze się to z tego, że PD oraz wytwarzanie nowych produktów wykorzystuje ograniczone zasoby, a także generuje dodatkową konsumpcję, potencjalne dysproporcje (społeczne i ekonomiczne) oraz zwiększa ryzyko (ekologiczne, polityczne i społeczne). Według badacza istnieje sześć kluczowych rozwiązań, które umożliwiają pogodzenie SD z PD:

- 1) edukowanie w zakresie zrównoważonego rozwoju (w chwili obecnej w polskim systemie edukacji kwestie zrównoważonego rozwoju są praktycznie pomijane w szkołach podstawowych i średnich – przedmioty te pojawiają się dopiero na studiach),
- 2) podnoszenie jakości projektowanych lub rozwijanych produktów w kierunku ich doskonałości (zapobieganie szkodom ekologicznym, środowiskowo przyjazna produkcja i użytkowanie produktów, społecznie akceptowalna i odpowiedzialna produkcja oraz użytkowanie produktów, sięganie do wskaźnika korzyści w odniesieniu do kosztów w efektywnym wykorzystaniu zasobów, nastawienie się na produkcję regionalną oraz regionalnych dostawców, długowieczność produktów jako ich kluczowa cecha),
- 3) zrównoważona konsumpcja i produkcja (np. poprzez tworzenie narodowych centrów czystszej produkcji),
- 4) ciągłe monitorowanie i analiza potrzeb oraz wymagań konsumentów (analiza potencjalnych potrzeb konsumenta jest jednym z początkowych działań w procesie PD),
- 5) uwzględnienie potrzeb interesariuszy skorygowanych przez pryzmat SD,
- 6) wykorzystywanie modelowania i właściwego przeprowadzenia wczesnych faz projektowania produktu (właśnie na tym etapie możliwa jest identyfikacja sporej liczby błędów i pomyłek, które w tej fazie nie są jeszcze tak kosztochłonne)<sup>12</sup>.

11 U. Holzbaur, *Sustainable Development and Product Development - Friend or Foe?*, „Journal for New Generation Sciences” 2010, vol. 8(3), s.64.

12 Tamże, s. 68–71.

Nie ma wątpliwości co do tego, że jakość stanowi kluczowy element zrównoważonego rozwoju, choć należy zauważyć, że musi być ona zbieżna z celami SD – „jakość nie za wszelką cenę”. Istnieją bowiem rozwiązania jakościowe, które z punktu widzenia użytkowanego produktu poprawiają znacząco jego długość życia, lecz często wywierają negatywne skutki na kwestie środowiskowe, np. lakiery bazujące na ołowiu i te wodorocieńczalne. Z tego względu jakość powinna być ciągle rozpatrywana w kontekście jej wpływu na SDG.

Z kolei Gould i inni<sup>13</sup> zwracają uwagę na kwestię wykorzystywania nowych metod rozwiązywania problemów niezrównoważonych cykli życia produktów. Przywołując słowa Einsteina: „Istotne problemy naszego życia nie mogą być rozwiązane na tym samym poziomie myślenia, na jakim byliśmy, kiedy je tworzyliśmy”<sup>14</sup>, prezentują wyniki badań nad nowym sposobem myślenia projektowego bazującym na metodzie *Design Thinking* – DT.

Autorzy wyodrębnili trzy niezupełnie odrębne fazy projektowania produktu opartego na metodzie DT:

- zrozumienie (identyfikacji trendów akademickich i przemysłowych w kontekście zrównoważonego rozwoju),
- działania projektowe (wykorzystanie zidentyfikowanych trendów we współprojektowaniu produktów),
- testowanie i walidacja zaprojektowanych działań oraz zebranych danych w celu syntetycznego ich zestawienia oraz poszukiwania potencjalnych miejsc wymagających poprawy)<sup>15</sup>.

W omawianym artykule sformułowano także kilka wytycznych dotyczących zespołów projektowych, do których zaliczono:

- włączanie rozwiązań związanych z SD we wczesne fazy rozwoju produktu,
- podejście skoncentrowane na wartości poszerzonej nie tylko o kwestie biznesowe, ale także społeczne, będące następstwem zdefiniowania wartości zrównoważonego rozwoju,
- wsparcie procesu decyzyjnego nie tylko w kontekście dostarczanych analiz i raportów, ale także dodatkowej wiedzy,
- łagodzenie skutków „iluzji poznawczej” (osądów, które odbiegają od rzeczywistości) poprzez wykorzystywanie określonych technik ją łagodzących,
- używanie wystarczająco prostych metod, technik i narzędzi zrównoważonego projektowania w celu upowszechnienia i zwiększenia dostępności ich wykorzystania,

13 R. Gould, C. Bratt, P. Mesquita, G. Broman, *Integrating Sustainable Development and Design-Thinking-Based Product Design*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019, s. 245–259.

14 <https://lubimyczytac.pl/cytat/120286> [dostęp: 28.06.2023].

15 R. Gould, C. Bratt, P. Mesquita, G. Broman, *Integrating Sustainable Development and Design-Thinking-Based...*, s. 248–249.

- wsparcie zespołów projektowych w edukacji na temat zrównoważonego rozwoju oraz wiedzy z nim związanej<sup>16</sup>.

Autorzy zwrócili uwagę nie tylko na techniczne aspekty metody DT, ale także na potrzebę zdobywania wiedzy przez poszczególnych członków zespołu projektowego przyjmującej następujące postacie:

- formalnej i abstrakcyjnej wiedzy zawartej w sformalizowanych instrukcjach,
- specyficznej wiedzy kontekstowej, którą udaje się uzyskać w bezpośredniej interakcji i wzajemnym dostosowywaniu podczas doświadczeń praktycznych dotyczących konkretnych aspektów,
- zakodowanej wiedzy zawartej w zasadach i procedurach,
- wiedzy osadzonej w normach, zasadach i wspólnych przekonaniach, mogącej wspierać złożone wzorce interakcji<sup>17</sup>.

Wnioski z projektu badawczego Goulda i innych sprowadzone zostały do dwóch podstawowych kwestii, tzn.:

- 1) kwestie SD powinny być integrowane z produktem w fazie kreowania pomysłów zaspakajających potrzeby klientów – zrównoważenie nie może być odrębnym dodatkiem do produktu,
- 2) proces zrównoważonego projektowania powinien być dostosowywany do konkretnych projektów, wynikających np. z potrzeb klientów, rynków zbytu czy też branży<sup>18</sup>.

W tej samej pozycji<sup>19</sup> Buchert i Stark<sup>20</sup>, bazując na pracy Shauiba i innych<sup>21</sup> dotyczącej indeksu zrównoważonego rozwoju produktu (*Product Sustainability Index* – ProdSI), stwierdzili, że – podobnie jak wspomniany wcześniej model TBL – ProdSI także zawiera trzy wymiary (ekonomiczny, społeczny i środowiskowy) i odzwierciedla wszystkie fazy cyklu życia produktu, przyporządkowując im 47 różnych mierników i wskaźników. Na potrzeby swoich badań autorzy dokonali redukcji wspomnianych mierników i wskaźników, ograniczając je zaledwie do dziewięciu (rysunek 29).

Następnie, wykorzystując schemat definiujący, realizujący oraz walidujący cele zrównoważonego rozwoju w procesie projektowania produktu wykonali badania empiryczne, bazujące na przeprowadzeniu wstępnych warsztatów eksperckich, a następnie na dziewięciu kierowanych wywiadach eksperckich.

16 Tamże, s. 250–251.

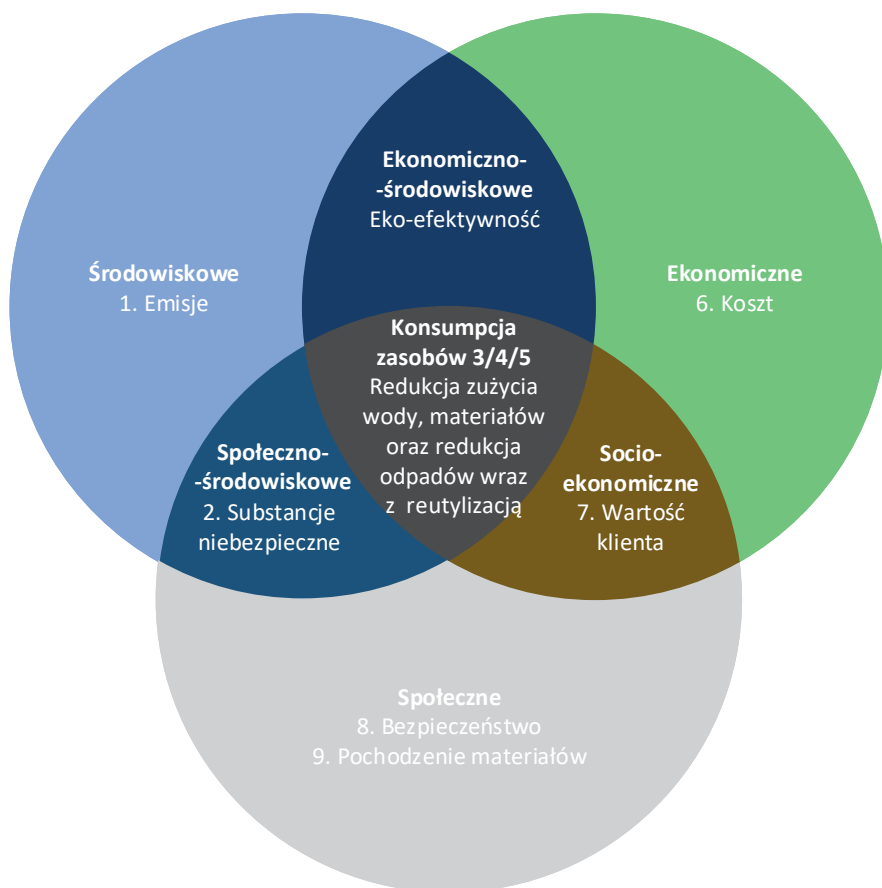
17 Tamże, s. 254.

18 Tamże, s. 256.

19 A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards...*

20 T. Buchert, R. Stark, *Integration of Sustainability Targets into the Product Creation Process of German Manufacturing Companies*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards...*, s. 211–228.

21 M. Shuaib, D. Seevers, X. Zhang, F. Badurdeen, K. Rouch, I.S. Jawahir, *Product Sustainability Index (ProdSI)*, „Journal Industry Ecological” 2014, vol. 18(4), s. 491–507.



**Rysunek 29.** Diagram Venna kryteriów zrównoważonego rozwoju wg Bucherta i Starka

**Źródło:** T. Buchert, R. Stark, *Integration of Sustainability Targets into the Product Creation Process of German Manufacturing Companies*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019, s. 213.

W ramach realizowanych warsztatów eksperckich zidentyfikowano indywidualną perspektywę siedmiu najważniejszych obszarów w kontekście definiowania zrównoważonego rozwoju, zaliczając do nich:

- 1) interesariuszy,
- 2) strategię, marketing oraz rozwój biznesu,
- 3) inżynierów produkcyjnych,
- 4) inżynierów testujących,
- 5) użytkowników systemu,
- 6) ustawodawstwo,
- 7) społeczeństwo.

Następnie zestawiono to z czterema fazami cyklu życia produktu, tzn.: projektowaniem, wytwarzaniem, użytkowaniem oraz końcem cyklu życia produktu, określając rekomendowane przez ekspertów działania (tabela 7).

**Tabela 7.** Interesariusze i zjednoczone cele zrównoważonego rozwoju w fazach cyklu życia produktu

Interesariusze	Etapy cyklu życia produktu			
	Projektowanie	Wytwarzanie	Użytkowanie	Koniec życia produktu – EoL
<b>Akcjonariusze</b>	Czas wprowadzenia produktu na rynek, niskie koszty rozwoju, koszty celowe	Niskie koszty, intensywność kapitału	Niezawodność i dostępność części zamiennych	Długie użytkowanie produktu
<b>Strategia, marketing, rozwój biznesu</b>	Innowacje, rozwój nowych rynków, zarządzanie wiedzą	Dostępność łańcuchów dostaw, ekonomiczne zużycie energii	Model biznesowy	–
<b>Inżynierowie wytwarzania</b>	Projektowanie wspomagające wytwarzanie DfM	Wykonalność, certyfikacja łańcuchów dostaw	Projektowanie wspomagające demontaż jako podstawa do skuteczności MRO <sup>22</sup>	–
<b>Inżynierowie testów</b>	Wczesne planowanie testowania produktów przy użyciu inteligentnych czujników	–	–	–
<b>Użytkownicy systemu</b>	–	–	Niezawodność i dostępność, komfort, model biznesowy	–
<b>Legislatorzy</b>	Zgodność z rozporządzeniem REACH	–	Krajowe regulacje emisji NO <sub>x</sub> , CO <sub>x</sub> oraz SO <sub>x</sub>	–
<b>Spółeczeństwo</b>	–	–	Redukcja hałasu	–

**Źródło:** T. Buchert, R. Stark, *Integration of Sustainability Targets into the Product Creation Process of German Manufacturing Companies*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019, s. 218.

<sup>22</sup> MRO (*Maintenance, Repair and Operation*) – zestaw działań pozwalający utrzymać urządzenia i systemy w ciągłości działania: konserwacja, naprawy, inne operacje.

Jak widać z tabeli 7, niezmiennie wśród celów interesariuszy dominuje minimalizacja kosztów i czasu wdrażania projektów przy względnej niezawodności, zapewnieniu części zamiennych oraz wydłużaniu cyklu życia produktu na rynku. Z kolei inżynierowie produkcji powinni wspierać proces projektowania wspomagającego wytwarzanie, poprawiając zdolności produkcyjne i certyfikując łańcuchy dostaw, przy jednoczesnym projektowaniu wspomagającym demontaż, bazującym na usystematyzowanych działaniach konserwacyjnych, naprawczych i operacyjnych (MRO). W zakresie ustawodawstwa eksperci za kluczowe uznali zgodność z rozporządzeniem UE dotyczącym chemikaliów REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* – rozporządzenie dotyczące rejestracji, oceny, wydawania i udzielania zezwoleń oraz ograniczeń w zakresie chemikaliów). Ich zdaniem fundamentalne są także krajowe regulacje prawne dotyczące emisji dwutlenku węgla i tlenków azotu. Ciekawym spostrzeżeniem może być fakt, że w fazie końca cyklu życia produktu nie pojawia się zbyt wiele celów poza wydłużeniem cyklu życia produktu.

Wywiady z ekspertami pokazały, że kwestie SD mają wpływ zarówno na interesariuszy zewnętrznych, jak i wewnętrznych. Efektem tego jest konieczność zachowania bardzo dużej elastyczności osób zajmujących się konkretnymi projektami (inżynier projektu) w celu pogodzenia często sprzecznych celów i działania jako integrator zrównoważonego rozwoju. Okazuje się, że pomimo stale utrzymujących się zasad projektowania związanych z kosztem, funkcjonalnością, jakością i bezpieczeństwem coraz większego znaczenia zaczynają nabywać w cyklu życia produktu aspekty społeczne i środowiskowe.

Wdrażając cele zrównoważonego rozwoju, stosuje się różne narzędzia jakościowe i ilościowe, które głównie wykorzystywane są do kalkulacji kosztów, zużycia materiałów, substancji niebezpiecznych itp. Znacznie rzadziej wykorzystywane są narzędzia komputerowego wspomagania klasy CAX (*Computer Aided X* – komputerowe wspomagania wybranego obszaru operacyjnego organizacji) na rzecz raczej prostych narzędzi typu MSExcel – eksperci zwrócili uwagę, że jest to obszar sporych wyzwań dla ich organizacji.

Testowanie i walidacja projektów realizowanych w badanych przedsiębiorstwach odbywa się nadal przy użyciu modeli inżynierskich bazujących na prototypach. Niestety, żaden z ekspertów nie uznał zrównoważonego rozwoju jako kluczowego czynnika wspomagającego podejmowanie decyzji<sup>23</sup>.

Z zaprezentowanego przeglądu literatury wyłania się obraz aktywności naukowej skoncentrowanej głównie na uświadamianiu konieczności implementacji zasad zrównoważonego rozwoju w gospodarce. Niemniej w wielu przypadkach obraz ten przyjmuje formę ideologicznego nawoływania biznesu do zmiany w kierunku SDG. Wydaje się, że póki nie zostaną wypracowane nowe modele biznesowe, bazujące

23 T. Buchert, R. Stark, *Integration of Sustainability Targets into the Product Creation Process...*, s. 225–226.



także na zupełnie innych założeniach ekonomicznych działania gospodarek, świat biznesu w dalszym ciągu będzie funkcjonował w oparciu o zyski, którym będzie doklejać się maskę zrównoważonych.

### 3.2. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym

Kolejnym ważnym zagadnieniem, które należy przeanalizować pod kątem przeglądu literatury, jest PD w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (CE). Pierwsza grupa artykułów dotyczyła tematyki modeli i strategii PD&CE. Ciekawie do tego zagadnienia ustosunkowali się Mesa i współautorzy. W swoim artykule dotyczącym trendów i perspektyw zrównoważonego projektowania produktów o otwartej architekturze w obliczu CE dokonali odniesienia do dwóch podejść związanych z cyklem życia produktu (LC), tzn. podejścia reaktywnego i prewencyjnego<sup>24</sup>. Pierwsze z podejść koncentruje się na minimalizowaniu negatywnych skutków oddziaływania produktu w fazie jego końca życia EoL (minimalizacja odpadów i emisji generowanych podczas procesu recyklingu, ponownego użycia lub regeneracji). Drugie podejście skupia się na uwzględnianiu założeń SD już na etapie projektowania produktów. Odnosząc to do trzech podstawowych paradygmatów wytwórczych, autorzy zaprezentowali porównanie różnych strategicznych działań w paradygmatach wytwarzania produktów, czyli produkcji masowej (duże wolumeny zunifikowanych produktów, projektowanie pojedynczych produktów), masowej kastomizacji (wykorzystującej modułowość jako narzędzie częściowej rekonfiguracji produktu, projektowanie wariantów i rodzin produktów) oraz masowej indywidualizacji (wykorzystującej modułowość w rekonfigurowalnych systemach adaptujących zdolności produkcyjne do zindywidualizowanych wymagań klienta w ramach otwartej architektury produktu – projektowanie zestawu modułów zdolnych do generowania wariantów i rodzin produktów).

Na podstawie badań literaturowych wspomniani autorzy zidentyfikowali sześć podstawowych kategorii SD dla modelu CE w kontekście PD<sup>25</sup>:

- 1) efektywność wykorzystania materiałów polegająca na redukcji wykorzystania surowców, minimalizacji konsumpcji energii i materiałów używanych w całym cyklu życia produktu (PLC),

24 J. Mesa, I. Esparragoza, H. Maury, *Trends and Perspectives of Sustainable Product Design for Open Architecture Products: Facing the Circular Economy Model*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology” 2019, vol. 6(2), s. 378.

25 Tamże, s. 385.

- 2) wykorzystanie materiałów o ograniczonym wpływie na środowisko, np. o minimalnym śladzie węglowym czy też materiałów niebezpiecznych,
- 3) optymalizacja faz EoL, czyli wzmocnienie wykorzystania ponownego użycia, regeneracji oraz recyklingu zużytych produktów i komponentów,
- 4) umożliwienie modernizacji (aktualizacji) produktów wydłużające ich cykl życia (zaprojektowanie komponentów w taki sposób, aby można je było demontować i dodawać),
- 5) redukcja emisji substancji stałych, ciekłych i lotnych we wszystkich fazach PLC,
- 6) zwielokrotnianie PLC, czyli projektowanie produktów i komponentów doprowadzające do wielu PLC poprzez wdrażanie ponownego użycia oraz regenerowania.

Mesa i współautorzy zwrócili także uwagę na przyszłe trendy, które będą się pojawiać w ramach działań PD&CE. Zaliczyli do nich<sup>26</sup>:

- zwiększenie integracji wytwórców wokół wdrażania strategii PD&CE w całym PLC,
- promocję ekoprojektowania (ED) dla rozwoju produktów regenerowanych,
- zajęcie się kwestiami ekonomicznymi wynikającymi z podjętych działań,
- zwiększenie nacisku na kwestie modułowości w EoL i związane z tym zagadnieniem problemy strategii decyzyjnych,
- włączenie zrównoważonego rozwoju produktu (*Sustainable Product Development* – SPD) do rodzin produktów przy zmiennych potrzebach klientów,
- odnalezienie kompromisu pomiędzy zrównoważonym rozwojem a strategiami masowej personalizacji i indywidualizacji,
- edukację na poziomie dzieci i młodzieży w kierunku zrozumienia konieczności wprowadzania zmian produktów w ramach CE,
- zachowania konsumenckie odchodzące od skrajnego konsumpcjonizmu na rzecz zrozumienia celów CE oraz SD,
- zmiany postrzegania dotychczasowej wartości dodanej na rzecz faktu, że zrównoważenie stanowić powinno wartość dodaną,
- zintegrowanie rynków i sektorów przemysłowych w ramach współpracy na rzecz CE&SD.

Oprócz trendów autorzy zidentyfikowali także podstawowe bariery, zaliczając do nich<sup>27</sup>:

- brak integracji pomiędzy przedsiębiorstwami przemysłowymi we współdziałaniu łańcucha dostaw produktów zużytych i produktów mogących podlegać regeneracji,
- brak strategicznego podejścia do projektowania produktów, które zakładałoby ponowne ich wykorzystanie lub użycie w innym cyklu życia produktów,

26 J. Mesa, I. Esparragoza, H. Maury, *Trends and Perspectives of Sustainable...*, s. 387–388.

27 Tamże, s. 388.

- zwiększenie się kosztów zrównoważonych produktów (koszty zarządzania logistyką odwrotną i regenerowania produktów odebranych z rynku oraz śledzenia produktu w jego całym PLC),
- rozważanie modułowości tylko w kategoriach atrybutów funkcjonalnych w procesach wytwarzania i użytkowania produktu,
- brak wykorzystania modułowości w ramach rodzin produktów jako narzędzia pozwalającego aktualizować produkty wedle zmieniających się wymagań klientów, zwłaszcza tych nowych,
- wykorzystywanie SPD tylko do pojedynczych produktów, bez uwzględnienia obecnych trendów rekonfiguracji i personalizacji produktów.

Jak widać, istnieje sporo do zrobienia w zakresie wdrażania modeli PD&CE. Warto też zwrócić uwagę, że niektóre bariery, takie jak edukacja czy też odejście od dotychczasowych paradygmatów produkcyjnych, pojawiały się również w ramach PD&SD. Tutaj zostały one poszerzone, np. o zachowania klientów czy też współpracę przedsiębiorstw, a nawet całych sektorów na rzecz CE.

Spreafico i Landi zajęli się z kolei kwestią wykorzystania różnorodnych strategii projektowania produktów do wdrażania CE i różnicami wynikającymi z tego podejścia pomiędzy studentami a praktykami. Na podstawie literatury naukowej wyodrębnili oni następujące strategie PD&CE<sup>28</sup>:

- zastępowanie obecnie wykorzystywanych materiałów na rzecz innych, które pozwalają realizować działania 10R, np. dłuższy cykl życia materiału może redukować marnotrawstwo czy też przedwczesne uzupełnianie, co wpływa na redukcję energii zużytej do dostarczenia nowego materiału,
- zastępowanie obecnie wykorzystywanych źródeł i technologii zasilania energią, co daje pierwszeństwo rozwiązaniom najmniej energochłonnym,
- optymalizacja struktury produktu, np. redukcja jego masy przy zachowaniu obecnej funkcjonalności,
- projektowanie produktów uwzględniające doświadczenie klienta (kontekst użytkowania, ergonomia, wymiary, doświadczenie poznawcze); ciekawym zagadnieniem, o którym nie wspominają autorzy, jest w tym aspekcie nadmiarowość niektórych rozwiązań – obecność w produkcie danych funkcji, które nie będą wykorzystywane przez użytkownika,
- zastępowanie obecnych składników produktu innymi, zdolnymi realizować te same funkcje (np. eliminowanie lub zastępowanie komponentów takimi, które w lepszym stopniu przyczyniają się do realizacji założeń PD&CE),
- segmentacja/dynamizacja części produktu i rytmu pracy (projektowanie produktu w taki sposób, aby mógł on lepiej dostosowywać się do kontekstu operacyjnego, co przypomina projektowanie wspomagające wytwarzanie i montaż DfM/DfA, z uwzględnieniem jednocześnie kontekstu środowiskowego),

28 C. Spreafico, D. Landi, *Using Product Design Strategies to Implement Circular Economy: Differences between Students and Professional Designers*, „Sustainability” 2022, vol. 14(1122), s. 4.

- wykorzystanie modułowości i standaryzacji jako potencjału do współdzielenia ich w ramach rodzin produktów oraz do późniejszego ponownego wykorzystania komponentów,
- redukowanie zużycia materiałów oraz odzyskiwanie energii w kontekście celów środowiskowych,
- zapewnienie ponadczasowego wzornictwa produktu wydłużające jego cykl życia i sprawiające, że użytkownik nie wyrzuci danego towaru przedwcześnie, co otwiera możliwości ponownego użycia produktu w jego dotychczasowej lub odrębnej funkcjonalności.

Dodatkowo Spreafico i Landi oprócz klasycznych działań CE sformułowanych w ramach zasady 10R dołożyli jeszcze zasadę zaprojektowania produktu w taki sposób, aby był on biodegradowalny. W ramach przeprowadzonych badań wykazali, że studenci wygenerowali znacznie więcej pomysłów rozwiązań sprzyjających CE aniżeli praktycy na co dzień zajmujący się PD.

Na temat produktów podatnych na aktualizację wypowiedział się również Zikopoulos. Dla zilustrowania problemu zaproponował on trzy różne typy produktów dostępnych na rynku (systemów SD), tzn.:<sup>29</sup>

- tylko nowe produkty,
- regenerowane produkty, osiągalne wskutek regeneracji produktów odebranych z rynku od klientów, u których skończyły one swój tradycyjny cykl życia,
- nowe i regenerowane produkty posiadające możliwości aktualizacji udostępniającej jego nowe funkcjonalności.

Dodatkowo autor przyjął następujące założenia:

- aktualizacja produktu poprawia jego poziom technologiczny, podczas gdy regeneracja nie ma na to wpływu,
- podczas aktualizacji identyfikowalność produktu zostaje zachowana,
- koszty aktualizacji technologicznej są ponoszone przez klientów.

Zikopoulos zaproponował także trzy grupy wskaźników zrównoważonego rozwoju:

- społeczne (użytkownicy produktu, użytkownicy ostatniej dostępnej technologii, średnia wartość wydatków na produkt, średnia wartość wydatków na technologię, średni poziom dostępnej technologii, średni poziom technologii na użytkownika),
- środowiskowe (wykorzystanie nowych surowców, zużycie materiałów zwrotnych, wykorzystanie nowych surowców na użytkownika, produkty z wydłużonym cyklem życia oraz generowanie marnotrawstwa),
- finansowe (zysk ze sprzedaży nowych produktów, zysk ze sprzedaży produktów regenerowanych, zysk ze sprzedaży zestawów aktualizujących oraz zysk całkowity)<sup>30</sup>.

29 C. Zikopoulos, *On the Effect of Upgradable Products Design on Circular Economy*, „International Journal of Production Economics” 2022, vol. 254, s. 4.

30 Tamże, s. 11.

Następnie autor dokonał oceny i porównania wskaźników środowiskowych oraz przeprowadził matematyczne obliczenia pozwalające mu dojść do następujących wniosków<sup>31</sup>:

- wykorzystanie regeneracji produktów lub ich aktualizacji zwiększa liczbę posiadaczy produktów średnio ponad 13%,
- regeneracja i aktualizacja produktów nie powodują ich kanibalizacji,
- w przypadku produktów z niższej półki wprowadzenie ich aktualizacji skutkuje wzrostem sprzedaży towarów ze starszą technologią w odniesieniu do samej regeneracji, ponieważ konsumenci wolą produkty nowe (choć starsze technologicznie) z możliwością aktualizacji aniżeli produkty regenerowane – badania Guide i Li<sup>32</sup>,
- zależność pomiędzy 3 alternatywnymi systemami SD a 15 wskaźnikami SD (społecznymi, środowiskowymi i finansowymi) połączonymi w pary pokazała, że 35 z 45 par wykazuje preferencje dla zaistnienia w określonym systemie, a dla pozostałych 10 par w zależności od wartości analizowanych parametrów systemy mogą ulegać zmianie,
- systemy regeneracji i regeneracji wraz z aktualizacją przewyższają w kwestiach środowiskowych (szczególnie w aspekcie społecznym) system produkcji nowego produktu, bez wyraźnej przewagi któregośkolwiek z nich,
- w aspekcie środowiskowym system produkcji nowych wyrobów przewyższa pozostałe dwa systemy w obszarze zużycia surowców pierwotnych oraz generowania odpadów – ograniczone zużycie jest następstwem mniejszej liczby użytkowników nowych produktów (co skutkuje mniejszą wydajnością społeczną),
- w aspekcie finansowym analiza wyników badań pokazuje, że system regeneracji sprawdza się najlepiej w przedsiębiorstwach zajmujących się wytwarzaniem i regeneracją – firma aktualizująca swoje produkty najlepiej radzi sobie z systemem regeneracji wraz z aktualizacją, przynosząc przy tym maksymalny zysk.

Same badania i ich wyniki posiadają kilka obszarów wymagających poprawy, takich jak kwestie różnorodności produktów i ich odmiennego wpływu na trzy grupy wskaźników SD oraz oceny kosztów projektowania wytworów regenerowanych i aktualizowanych. Niemniej z badań wynika, że aktualizacja produktów zarówno nowych, jak i regenerowanych posiada duży potencjał, jeśli chodzi o kwestie SD&CE.

Koncepcję cyrkularnego projektowania produktów (*Circular Product Design* – CPD) zaprezentowali Mestre i Cooper<sup>33</sup>. Zaproponowany przez autorów system opiera się na dwóch poziomach – technicznym i biologicznym – którym przypisano konkretne strategie. Każdy z nich jest analizowany na poszczególnych etapach PLC, tzn.: projektowania i rozwoju nowej koncepcji, doboru materiałów oraz zoptymalizowania ich wykorzystania w wyrobie gotowym, zoptymalizowanego wytwarzania,

31 Tamże, s. 15.

32 V. Guide Jr., J. Li, *The Potential for Cannibalization of New Products Sales by Remanufactured Products*, „Decision Science Journal” 2010, vol. 41(3), s. 547–572.

33 A. Mestre, T. Cooper, *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20, s. 1620–1635.

zoptymalizowanego systemu dystrybucji, użytkowania produktu o zmniejszonym wpływie na środowisko, wydłużenia czasu użytkowania oraz zoptymalizowanego zakończenia cyklu życia.

Projektowanie wspomagające cykl techniczny (*Design for a Technical Cycle* – DfTC) koncentruje się na kwestii optymalnego wykorzystania techniki i technologii w całym cyklu życia produktu (PLC). Zadaniem tej optymalizacji jest przekształcanie wektorów wejścia (materiały, energia itp.) w celu osiągnięcia najwyższych poziomów wydajności. Kierunek optymalizacji będzie zmierzał do minimalizacji wykorzystania zasobów materiałowych i energetycznych czy też różnorodnych emisji w całym cyklu życia produktu przy dostarczeniu możliwie najwyższej wartości nie tylko dla użytkownika, ale i społeczeństwa. W ramach tego podejścia mogą być realizowane dwie strategie – spowalniania obiegu (*Slow the Loop Strategies* – SLS) oraz zamykania obiegu (*Close the Loop Strategies* – CLS). Pierwsza z nich – SLS – zakłada spowolnienie przepływu materiałów na każdym etapie PLC i ma na celu wydłużenie trwałości i żywotności produktu oraz zwiększenie wartości dodanej. Strategia CLS koncentruje się z kolei na domknięciu obiegu projektowanego produktu poprzez uwzględnienie w procesie projektowania kwestii recyklingu czy też wykorzystania materiałów sprzyjających środowisku<sup>34</sup>.

Projektowanie wspierające biologiczny obieg (*Design for a Biological Cycle* – DfBC) sięga po rozwiązania, które występują w naturalnych ekosystemach lub są nimi inspirowane. Dla przykładu, materiały wykorzystywane w danym produkcie podlegają naturalnemu biegowi w przyrodzie i czasie, zbliżają się zatem do doskonałej wydajności zamkniętych pętli ekosystemów. Podobnie jak w przypadku DfTC wyróżnia się tutaj dwie strategie projektowania – jedna jest inspirowana biologicznym obiegiem zamkniętym (*Bio-inspired loop strategies* – BioILS), druga bazuje na biologicznym obiegu zamkniętym (*Bio-based loop strategies* – BioBLS). Strategia BioILS opiera się na bionice (wykorzystując np. biomimetykę<sup>35</sup>), a więc działaniu, którego nadrzędnym celem jest wykorzystanie naturalnych systemów występujących w przyrodzie jako wzorca dla realizacji konkretnych projektów inżynierskich. Z kolei strategia BioBLS wykorzystuje w projektowaniu, a później w wytwarzaniu produktów, materiały biologiczne, które w ostatniej fazie cyklu życia produktu ulegną rozkładowi do biosfery, stając się jej składnikami odżywczymi. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na konieczność zachowania równowagi związanej z produkcją materiałów biologicznych (bilansując energię, składniki odżywcze, przestrzeń itp.) oraz ich rozpadem, który w przypadku masowej skali może doprowadzać do zakłócania całych ekosystemów. Dlatego obydwie strategie (techniczne i biologiczne) powinny być analizowane równolegle, mając swoje rozwinięcie w etapach PLC<sup>36</sup> (tabela 8).

34 Tamże, s. 1624.

35 Zjawisko polegające na upodabnianiu się zwierząt i roślin do otoczenia.

36 A. Mestre, T. Cooper, *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20, s. 1625–1627.

**Tabela 8.** Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne – od idei do dystrybucji

Strategie projektowania PLC	Cykl techniczny		Cykl biologiczny	
	Wolnego obiegu – SLS	Zamkniętego obiegu – CLS	Bioinspirowana – BioILS	Bazująca na Bio – BioBLS
1	2	3	4	5
<b>Dobór materiałów o niskim wpływie środowiskowym</b>	Materiały: czystsze, odnawialne, mniej energochłonne, podlegające recyklingowi	Materiały: z recyklingu, podlegające recyklingowi, biodegradowalne, mniej energochłonne, foto-degradowalne, odnawialne i czystsze	Materiały: bio-materiały, czystsze, podlegające recyklingowi, biodegradowalne, foto-degradowalne	Materiały: odnawialne, biodegradowalne, kompostowalne, czystsze, biomateriały, foto-degradowalne
<b>Redukcja wykorzystania materiałów</b>	Redukcja masy i objętości (transport)	Redukcja masy i objętości (transport)	Biomimikra i bionika* (struktury biologiczne), redukcja masy i objętości	Redukcja masy (mniej materiału = mniejsza presja na życie biologiczne), redukcja objętości (transport)
<b>Optymalizacja technik produkcyjnych</b>	Alternatywne techniki wytwarzania, mniej etapów produkcji, niższa/czystsza konsumpcja energii, mniej odpadów produkcyjnych, mniejsze/czystsze wykorzystanie materiałów eksploatacyjnych	Alternatywne (zoptymalizowane) techniki wytwarzania, mniej etapów produkcji, niższa/czystsza konsumpcja energii, mniej odpadów produkcyjnych, mniejsze/czystsze wykorzystanie materiałów eksploatacyjnych, odnawialne źródła materiałów i energii	Alternatywne techniki wytwarzania, niższa/czystsza konsumpcja energii, mniej produkcyjnego marnotrawstwa, mniejsze/czystsze wykorzystanie materiałów eksploatacyjnych, symbioza przemysłowa	Alternatywne techniki wytwarzania, niższa/czystsza konsumpcja energii, kultywacja, mniejsze/czystsze wykorzystanie materiałów eksploatacyjnych



1	2	3	4	5
<b>Optymalizacja systemu dystrybucji</b>	Mniejsze/czystsze opakowanie wielokrotnego użytku, energooszczędne procesy logistyczne (np. środki transportu)	Mniejsze/wielokrotnego użytku/biodegradowalne (zero odpadu) opakowanie, energooszczędne procesy logistyczne (np. środki transportu), eliminacja procesów logistycznych na rzecz „zrób to sam” – energooszczędne procesy logistyczne (np. środki transportu)**	Mniejsze/czystsze opakowanie wielokrotnego użytku	Biomateriały opakowaniowe, wybór efektywnych energetycznych środków transportu, efektywna logistyka dystrybucji – „wyhoduj sobie to sam” ( <i>Grow It Yourself</i> – GIY), eliminacja procesów logistycznych na rzecz „zrób to sam”***

\* Zastosowanie tego typu rozwiązań nie jest nowością. Na początku XX wieku Gaudi wykorzystywał bionikę w większości swoich projektów budowlanych, zob. G. van Hensbergen, *Biografia. Gaudi – Geniusz z Barcelony*, Warszawa 2015, s. 243–275.

\*\* Wytwarzanie addytywne w postaci druku 3D daje już takie możliwości przy wykorzystaniu polimerów, spieków, skrobi itp. Taki rodzaj produkcji będzie mógł być realizowany w domach.

\*\*\* Uprawianie materiałów do wytwarzania addytywnego w domu.

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie A. Mestre, T. Cooper, *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20, s. 1626–1627.

Tabela 8 prezentuje rozwinięcie strategii technicznej i biologicznej projektowania cyklu życia w fazie od wyboru i doboru materiałów, z których produkt będzie zbudowany, do procesu dystrybucji wyrobów gotowych. Zaprezentowane działania w ramach każdego etapu PLC oraz strategii pokazują kierunki, w ramach których powinny podążać działy R&D&I. Wyraźnie z nich wynika, że kwestia CE staje się priorytetowym wyznacznikiem procesu PD.

Z kolei tabela 9 ukazuje wykaz pożądaných dla CE rozwiązań projektowych, które powinny być uwzględniane w trakcie użytkowania produktu.



**Tabela 9.** Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne w trakcie użytkowania

Strategie projektowania PLC	Cykl techniczny		Cykl biologiczny	
	Wolnego obiegu – SLS	Zamkniętego obiegu – CLS	Bioinspirowana – BioILS	Bazująca na Bio – BioBLS
<b>Redukcja wpływu środowiskowego w trakcie użytkowania</b>	Mniejsze zużycie energii, czystsze źródła energii, czystsze i mniejsze wykorzystywanie materiałów eksploatacyjnych, brak strat energii i materiałów eksploatacyjnych	Mniejsze zużycie energii, czystsze źródła energii, czystsze i mniejsze wykorzystywanie materiałów eksploatacyjnych, brak strat energii i materiałów eksploatacyjnych, funkcja w produkcji jako usługa, nie zaś nowy produkt, możliwość aktualizacji produktów (modułowość)	Mniejsze zużycie energii, czystsze źródła energii, czystsze materiały eksploatacyjne	Czystsze źródła energii, czystsze i mniejsze wykorzystywanie materiałów eksploatacyjnych, brak marnotrawstwa energii oraz materiałów eksploatacyjnych
<b>Optymalizacja długości życia produktu</b>	Niezawodność i trwałość, łatwiejsza konserwacja i naprawa, możliwość rozbudowy i adaptacji, modułowa struktura produktu, standaryzacja i kompatybilność, możliwość demontażu i ponownego montażu, klasyczny wzór (niepodatny na mody), silna relacja użytkownik–produkt (konstrukcja trwała emocjonalnie)	Niezawodność i trwałość, łatwiejsza konserwacja i naprawa, możliwość rozbudowy i adaptacji, modułowa struktura produktu, standaryzacja i kompatybilność, możliwość demontażu i ponownego montażu, klasyczny wzór (niepodatny na mody), silna relacja użytkownik–produkt (konstrukcja trwała emocjonalnie), usługi utrzymania funkcji (odbiór zużytych produktów i wymiana ich na nowe)	Biomimikra i bionika, demontaż oraz powtórny montaż, modułowa struktura produktów (komórkowa), samonaprawa (np. samouszczelnianie, samoodbudowanie itp.)	Niezawodność i trwałość wpisana w produkt, np. biodegradacja w określonym czasie, łatwa konserwacja i naprawa, w tym samonaprawa i zrównoważony wzrost (żywe materiały)

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie A.A. Mestre, T. Cooper, *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20, s. 1626–1627.

W ramach zaprezentowanych rozwiązań wyraźnie widać powrót do produktów trwałych i o wysokim poziomie jakości. Wszystko to jednak powinno zostać osiągnięte w ramach realizowania wytycznych projektowania uwzględniającego założenia Ce i SD. Ostatni z etapów – zakończenie cyklu życia i ponowne projektowanie – przedstawia tabela 10.

**Tabela 10.** Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne – zakończenie cyklu życia i ponowne projektowanie

	Cykl techniczny		Cykl biologiczny	
	Wolnego obiegu – SLS	Zamkniętego obiegu – CLS	Bioinspirowana – BioILS	Bazująca na Bio – BioBLS
<b>Optymalizacja systemu zakończenia życia produktu</b>	Ponowne użycie produktów, regeneracja, odnawianie, recykling materiałów, bezpieczniejsze odzyskiwanie – spalanie	Biodegradowalność, regeneracja, odnawianie, recykling materiałów, odbiór produktu w celu demontażu i odzysku materiałów, kompostowalność, wartości odżywcze (odpad = jedzenie), fotodegradowalność, ponowne użycie produktu, zmiana przeznaczenia funkcji produktu, systemy odzyskiwania dla produktów	Biodegradowalność, ponowne użycie produktów, zmiana przeznaczenia funkcji produktów	Biodegradowalność, kompostowalność, rozpuszczalność, wartość odżywcza (odpad = żywność), fotodegradacja
<b>Rozwój nowych koncepcji/przegląd procesu projektowania/inne koncepcje projektowe</b>	Dematerializacja, dzielenie się użytkowaniem produktu (prawo własności), integracja funkcji, optymalizacja funkcjonalna produktu (komponentów)	Dematerializacja, dzielenie się użytkowaniem produktu (prawo własności), integracja funkcji, optymalizacja funkcjonalna produktu (komponentów), funkcja jako usługa (nie-produkt), modele biznesowe oparte na cyrkularności	Biodegradowalność	Alternatywna (biologiczna) produkcja

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie A. Mestre, T. Cooper, *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20, s. 1626–1627.

Proces projektowania produktu powinien rozważyć każdą ze strategii projektowania: SLS, CLS, BioILS oraz BioBLS. Należy wybierać w każdej z opcji rozwiązanie, które z punktu widzenia środowiskowego są najlepsze. W ramach prezentowanego modelu pozostaje do przemyślenia jeszcze wiele kwestii, np.:

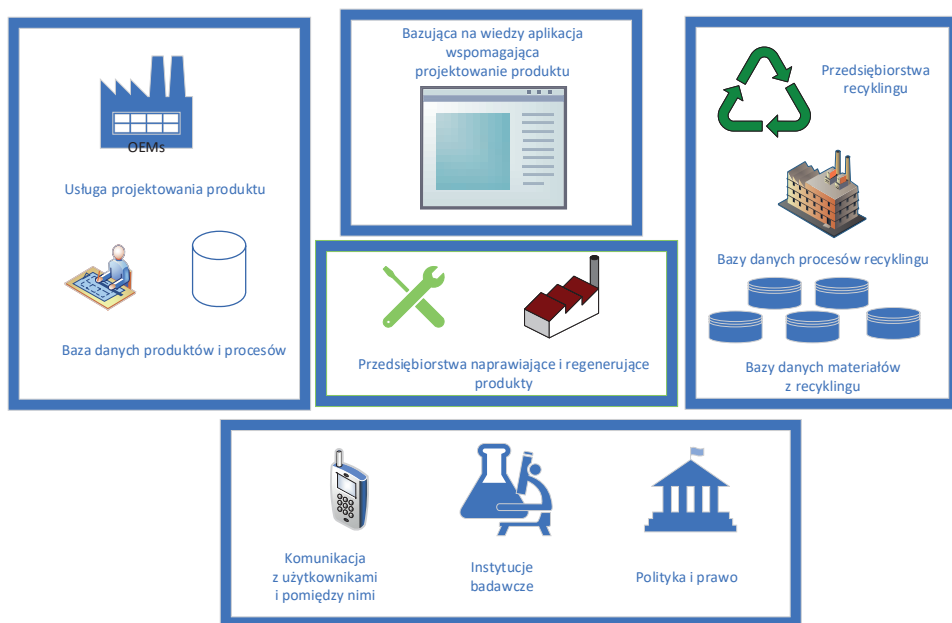
- kosztów (tak radykalne zmiany na globalnym, nastawionym na produkcję masową rynku nie wydają się możliwe do szybkiego przeprowadzenia),
- czasu (jest potrzebny na wdrażanie takich innowacji jak bionika),
- procesów i infrastruktury (odebranie z rynku zużytych produktów, ich ponowne zagospodarowanie itd.),
- klientów (świadomych konsumentów łamiących dotychczasowe standardy szybkiej i taniej reakcji na potrzeby konsumenta),
- dostawców (w wielu przypadkach nie będą przygotowani do tak radykalnych zmian w swojej ofercie, jeżeli chodzi np. o biomateriały),
- prawnych (choćby kwestie gwarancji na produkty odnowione lub regenerowane),
- innych.

Wyżej wymienione elementy wskazują, że globalna gospodarka skostniała i zakotwiczyła się na dobre na drugiej rewolucji przemysłowej (produkcja masowa – linia montażowa Forda) wspieranej w większym lub mniejszym stopniu osiągnięciami trzeciej rewolucji przemysłowej (czyli automatyzacją oraz technologiami IT). Utrzymanie takiego *status quo* leży w głównej mierze w większości sektorów i przemysłów, ponieważ wygoda funkcjonowania w produkcji masowej jest niewspółmierna do konieczności elastycznego i dynamicznego zmieniania świata poprzez edukację, kształtowanie zachowań konsumenckich (które niejednokrotnie stwarzają konieczność wyjścia ze strefy komfortu) czy też szukania nowych modeli biznesowych. Dlatego dopóki nie pojawi się sytuacja iście kryzysowa, dopóty prezentowane modele (takie jak Mester i Coopera) będą tylko naukową wizją przyszłości.

Kwestię operacyjnego wspomagania PD&CE systemami IT podnieśli Wallat wraz ze współautorami, proponując bazujące na wiedzy systemy wspomagania projektowania produktów. Założyli oni wykorzystanie czterech podstawowych działań gospodarki cyrkularnej, tzn. ponownego użycia, naprawy, regeneracji oraz recyklingu, wyróżniając w całym modelu następujących interesariuszy CE, czyli producenta wyrobów wraz z działem R&D&I, producentów oryginalnych komponentów (*Original Equipment Manufacturer* – OEM), dostawców pierwotnych materiałów, dystrybutorów, sprzedawców, użytkowników, przedsiębiorstwa zajmujące się naprawą i serwisem produktów, recyklingiem, regeneracją oraz demontażem. Autorzy zauważyli, że proces projektowania produktów wspomagający CE nie może być dobrze realizowany, jeśli inżynierowie nie rozumieją interesariuszy CE, a sami interesariusze nie mają wiedzy co do materiałów i rozwiązań wykorzystywanych przez inżynierów. Ten brak wiedzy pomiędzy interesariuszami stanowi główny problem w budowie tego typu modelu<sup>37</sup>. Na tej podstawie autorzy zaproponowali

37 P. Wallat, S. Lawrenz, A. Lohrengel, *A Knowledge-based Product Design Assistance for the Advanced Circular Economy*, Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Stuttgart, Deutschland 2021, s. 4.

system wspomagający projektowanie produktów oparty na wiedzy, w którym przypisano miejsce każdemu z interesariuszy (rysunek 30).



**Rysunek 30.** System wspomagania projektowania produktów oparty na wiedzy

**Źródło:** P. Wallat, S. Lawrenz, A. Lohrengel, *A Knowledge-based Product Design Assistance for the Advanced Circular Economy*, Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Stuttgart, Deutschland 2021, s. 4.

Prezentowany model opiera się na bazie danych, która zawiera w sobie takie elementy jak: pierwiastki chemiczne, materiały, technologię połączeń oraz technologię recyklingu. Warto zwrócić uwagę, że te dane są w zasadzie potrzebne przedsiębiorstwom zajmującym się recyklingiem, a różnorodność kombinacji wspomnianych elementów często utrudnia proces, czyniąc odzyskane materiały droższymi niż surowce pierwotne. Ponadto przedsiębiorstwo zajmujące się recyklingiem nie dysponuje dostępną wiedzą, czy elementy poddawane recyklingowi nie posiadają perspektyw ich ponownego użycia lub regeneracji. W takim wypadku element charakteryzujący się takim przeznaczeniem i jednocześnie poddany recyklingowi generowałby negatywny skutek środowiskowy oraz byłby sprzeczny z założeniami CE. Podobne problemy pojawiają się także u innych interesariuszy, z których każdy ma zapotrzebowanie na odmienny typ wiedzy w zależności od profilu swoich działań. Budowa takiej bazy danych z pewnością ułatwiłaby realizację założeń CE, implementując pierwotne myśli dotyczące CE projektanta<sup>38</sup>.

<sup>38</sup> Tamże, s. 3.

Zaproponowany przez autorów system wymaga stworzenia kolejnego, celowo zaprojektowanego i zorganizowanego układu identyfikacji towarowej, który poza konkretnym przeznaczeniem wynikającym z działań CE posiadałby dodatkowe informacje związane z interesariuszami. Należy przy tym zwrócić uwagę, że przy tak różnorodnych systemach IT, którymi operują przedsiębiorstwa, branże czy też sektory przemysłowe, budowa takiego rozwiązania stanowiłaby nie lada wyzwanie. Stąd pewnie rolę świata nauki powinno być tworzenie samej koncepcji systemu wraz z jego operacjonalizacją.

Bardzo ciekawy model projektowania produktu wspomagającego CE i jednocześnie wspomaganego sztuczną inteligencją przedstawili Ghoreishi i Happonen<sup>39</sup>. Autorzy, wskazując na najnowsze cyfrowe technologie, głównie związane z I4.0, takie jak inteligentne czujniki, sztuczna inteligencja, Internet Rzeczy czy też technologia *Blockchain*, zauważają, że odgrywają one kluczową rolę w doskonaleniu skuteczności wdrażania działań związanych z CE. Stwierdzają, że właściwe wykorzystanie technologii I4.0 pozwala zwiększyć wydajność logistyki odwrotnej, dzięki czemu materiały i produkty mogą mieć swoje drugie życie, a procesy recyklingu stają się bardziej skuteczne, chroniąc w ten sposób ograniczone zasoby<sup>40</sup>.

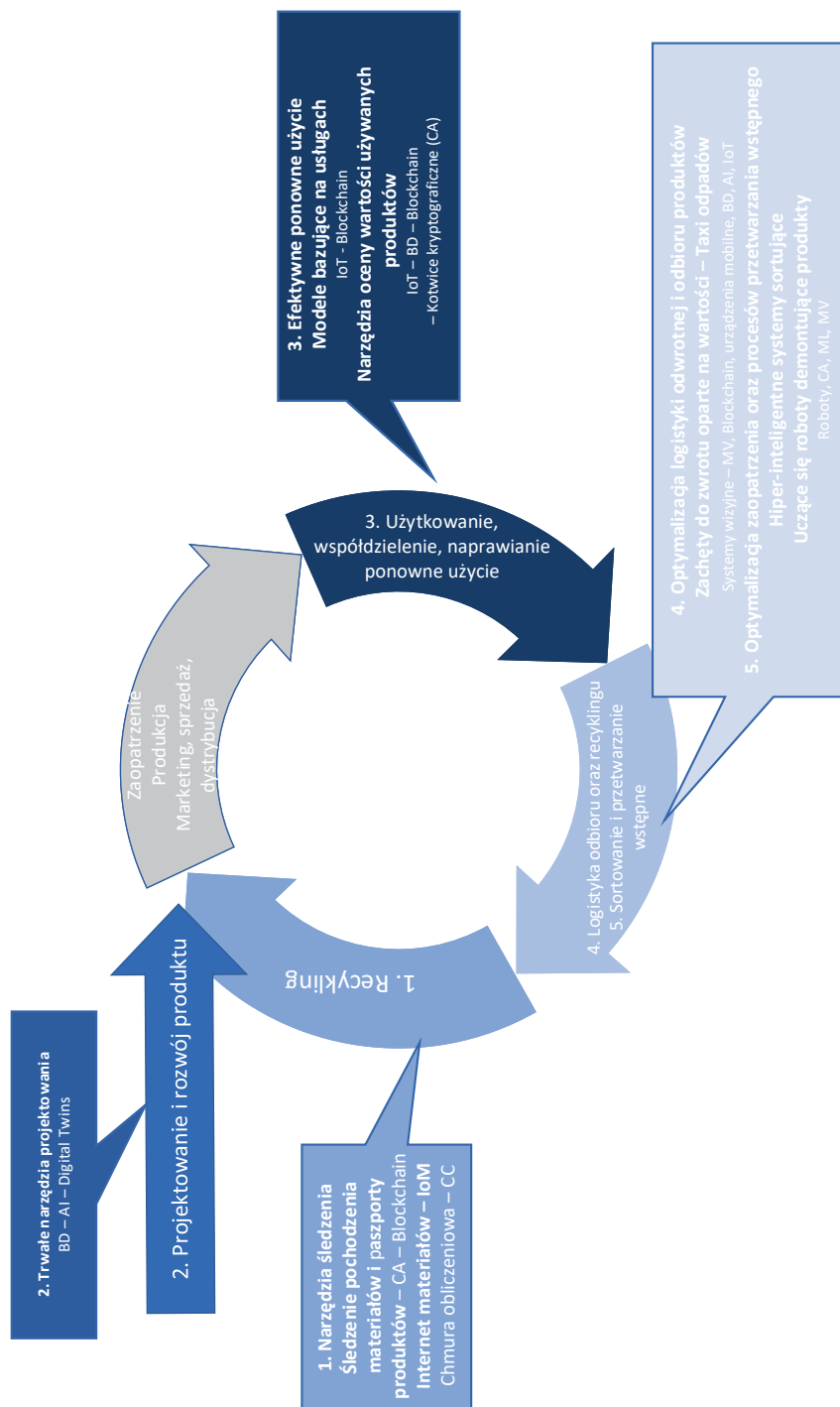
Bazując na prezentacjach Światowego Forum Ekonomicznego i Strategii Accenture z 2019 roku<sup>41</sup>, Ghoreishi i Happonen zaproponowali możliwe wykorzystanie technologii I4.0 w cyklu obiegu zamkniętego, co prezentuje rysunek 31. Zdaniem autorów w procesie projektowania produktu kluczową rolę odgrywać będą analiza dużych zbiorów danych (*Big Data Analytics* – BDA), sztuczna inteligencja (AI) oraz cyfrowe bliźniaki (*Digital Twins* – DT<sub>w</sub>), które w pierwszej kolejności będą wykorzystywać narzędzia śledzące i analizujące pochodzenie materiałów oraz surowców z wyrobów gotowych znajdujących się na rynku. Wspierane będzie to poprzez kotwice kryptograficzne (*Cryptographic Anchors* – CA)<sup>42</sup>, odgrywające rolę bezpośredniej identyfikacji towarowej (swoisty odcisk palca produktu), które osadzone w technologii łańcucha *Blockchain* skutecznie uniemożliwią manipulację osobom zewnętrznym przy kodach produktu. Dzięki użyciu tej samej technologii każdy z produktów będzie miał przypisany paszport, a Internet Rzeczy, w tym wypadku Internet Materiałów, zawarty w chmurze obliczeniowej (CC), będzie skutecznie wspierał projektantów w ich pracach.

39 M. Ghoreishi, A. Happonen, *New Promises AI Brings into Circular Economy Accelerated Product Design: A Review on Supporting Literature*, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on Environment Pollution and Prevention 2019 & E3S Web of Conferences 2020, vol. 158, ICEPP.

40 Tamże, s. 2.

41 Platforma na rzecz przyspieszenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Wykorzystanie czwartej rewolucji przemysłowej w gospodarce o obiegu zamkniętym. Elektronika użytkowa i opakowania z tworzyw sztucznych – The Platform for Accelerating the Circular Economy. Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the Circular Economy Consumer Electronics and Plastics Packaging, PACE, Genewa, Szwajcaria 2019, [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Harnessing\\_4IR\\_Circular\\_Economy\\_report\\_2018.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_4IR_Circular_Economy_report_2018.pdf) [dostęp: 12.09.2024].

42 [https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/5-5-predictions-5-innovations-will-help-change-lives-within-next-5-years/?mhsrc=ibmsearch\\_a&mhq=cryptographic%20anchor%20technology](https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/5-5-predictions-5-innovations-will-help-change-lives-within-next-5-years/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=cryptographic%20anchor%20technology) [dostęp: 4.07.2023].



**Rysunek 31.** Technologie przemysłu 4.0 w cyrkularności

**Źródło:** M. Ghoreishi, A. Happonen, *New Promises AI Brings into Circular Economy Accelerated Product Design: A Review on Supporting Literature*, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on Environment Pollution and Prevention 2019 & E3S Web of Conferences 2020, vol. 158, ICEPP, s. 5.

Kolejna faza będzie się opierać na efektywnym ponownym wykorzystaniu produktów poprzez modele bazujące na usługach (*Service Based Models* – SBM), odwołujące do IoT oraz *Blockchain*. Sfera wytwarzania, tak istotna i optymalizowana przez drugą i trzecią rewolucję przemysłową, poprzez możliwość ponownego wykorzystania produktów już wytworzonych staje się mniej ważna na rzecz sfery usługowej. Dodatkowo narzędzia oceny wartości używanych produktów wspomagane narzędziami IoT, BD, *Blockchain* oraz CA pozwolą klientom ponownie używać produkty, dzielić się nimi lub je naprawiać.

Faza czwarta wiąże się z logistyką odwrotną, a w szczególności z optymalizacją, organizacją i zarządzaniem działań związanych z gromadzeniem zużytych produktów oraz systemem zachęt do zwracania produktów zużytych. Ghoreishi i Happonen zwracają uwagę na konieczność wykorzystania w tym miejscu systemów wizyjnych (*Machine Vision* – MV), aplikacji mobilnych (*Mobile Application* – MA) oraz zapewniającej bezpieczeństwo danych technologii *Blockchain*. Innym rozwiązaniem, które pojawia się w tym miejscu, są mobilne punkty odbioru odpadów przypominające system działania taksówek (*Waste Taxi* – WT), wykorzystujące technologie BD, AI oraz IoT.

Ostatni etap to system demontażu wykorzystujący uczące się roboty oraz hiper-inteligentny system sortowania optymalizujący proces pozyskiwania surowców i przetwarzania wstępnego. Pierwszy z systemów bazuje na robotach, uczeniu maszynowym (*Machine Learning* – ML<sup>43</sup>) oraz CA, drugi, wykorzystując MV, CA oraz roboty, przygotowuje wstępnie przetworzone i posortowane materiały pierwszemu z procesów, a więc identyfikacji materiałów dla procesu projektowania.

Sama wizja modelu, choć bardzo ciekawa, w zderzeniu z dotychczasowymi uwarunkowaniami funkcjonowania biznesów posiada wiele obszarów operacyjnych, wymagających doprecyzowania. Globalne łańcuchy dostaw i światowi dostawcy, chcąc funkcjonować w takim modelu, musieliby wprowadzić przede wszystkich zintegrowany i spójny system identyfikacji towarowej produktów, podzespołów i materiałów. Z pewnością jego stworzenie wymagałoby powszechnego kompromisu (nie zaś globalnego monopolu), co można by było osiągnąć. Taki system nie powinien bazować na zasadach rynkowych, ale być bezpłatnym narzędziem wspomagającym przedsiębiorstwa w działaniach na rzecz CE. W innym opracowaniu autorzy na podstawie trzech studiów przypadków dokonali walidacji swojego modelu<sup>44</sup>.

Zaprezentowane wybrane artykuły wskazują trendy dotyczące PD w kontekście CE. Nietrudno zauważyć, że wielu przypadkach problematyka CE łączyła się z kwestiami zrównoważonego rozwoju (SD), wzajemnie się przenikając. Warto także zauważyć, że w artykułach pojawiają się dodatkowe pojęcia, takie jak zrównoważone

43 Komputery i maszyn uczą się na podstawie swoich doświadczeń bez wymaganej aktualizacji oprogramowania, <https://www.sap.com/poland/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> [dostęp: 4.07.2023].

44 A. Happonen, M. Ghoreishi, *Key Enablers for Deploying Artificial Intelligence for Circular Economy Embracing Sustainable Product Design: Three Case Studies*, Proceedings, Conference Paper in AIP Conference Proceedings, Selangor Darul Ehsan, Malaysia 2020, vol. 2233 (1).



projektowanie, zrównoważony rozwój produktu czy też ekoprojektowanie, które z pewnością mogłyby poszerzyć kwerendę związaną z przeglądem literatury. W literaturze przedmiotu przy obydwu tych pojęciach (CE i SD) pojawia się jeszcze słowo „zielony” jako przykład proekologicznego spojrzenia na sprawy związane z projektowaniem produktów. Temu pojęciu zostanie poświęcony następny rozdział pracy.

### 3.3. Zielone projektowanie i rozwój produktu

Samo pojęcie zielonego projektowania i rozwoju produktu bywa różnie definiowane. Zdaniem Tian<sup>45</sup> przemysłowa interpretacja zielonego projektowania produktu (*Green Design* – GD) jest operacyjnym wykorzystaniem 4R w procesie projektowania produktu, tzn. redukowania, ponownego użycia, recyklingu oraz regeneracji. Autor zwraca uwagę, że GD nie dotyczy tylko samego procesu projektowania, ale także i szerszej perspektywy całego PLC. Gdyby przyjąć taką definicję, w zasadzie zielone projektowanie nie byłoby niczym innym jak tylko PD w warunkach CE, jednakże Tian wskazuje na trzy wymiary koordynujące GPD, tzn. czynniki techniczne, ergonomiczne, estetyczne oraz środowiskowe.

Z kolei Bai i współautorzy<sup>46</sup> definiują GD jako działania, których głównym celem jest redukcja wpływu samego produktu na środowisko. Same rozwiązania zielonego projektowania powinny być kompleksowe rozpatrywane w ramach trzech głównych czynników: środowiskowego, technologicznego oraz ekonomicznego.

W ramach aspektów środowiskowych autorzy wykorzystali opracowanie Masui<sup>47</sup> i współautorów<sup>47</sup>, którzy to wskazali 15 środowiskowych wymagań klientów oraz wskaźników inżynierskich (tabela 11).

Dokonując krytycznej analizy, m.in. uwarunkowań środowiskowych wskazanych przez Masui i współautorów, Bai i inni<sup>48</sup> wyodrębnili dziewięć podstawowych czynników zielonego projektowania, które powinny w tym procesie zostać poddane ocenie, a są to:

- 1) efektywność energetyczna (rozpatrywana zarówno w procesie wytwarzania, jak i użytkowania wyrobów),
- 2) materiały (wykorzystanie materiałów odnowionych lub ponownie wykorzystanych),

45 Y. Tian, *Green Product Design Based on Fuzzy Hierarchy Evaluation*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology, Hangzhou China, 2016, s. 798.

46 Z. Bai, L. Mu, H. Lin, *Green Product Design Based on The BioTRIZ Multi-Contradiction Resolution Method*, „Sustainability” 2020, vol. 12(10), s. 4.

47 K. Masui, T. Sakao, A. Inaba, *Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1<sup>st</sup> report) a Methodology in Early Stage of DfE*, Proceedings, The IEEE Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan 2001.

48 Z. Bai, L. Mu, H. Lin, *Green product design based on the BioTRIZ...*, s. 5.



- 3) demontaż (możliwości demontażu i ponownego montażu na różnych etapach PLC),
- 4) długość życia produktu,
- 5) emisja substancji niebezpiecznych dla środowiska (w procesie wytwarzania, użytkowania oraz na etapie końca życia produktu – EoL),
- 6) utylizacja produktu (przechowywanie i transport zużytego produktu oraz trudności wynikające z jego złomowania),
- 7) efektywność (stopień realizacji zaprojektowanych funkcji produktu oraz jego efektywność pracy),
- 8) niezawodność (np. bezpieczeństwo),
- 9) koszty (wszystkie pojawiające się koszty w okresie całego cyklu życia produktu).

**Tabela 11.** Środowiskowe wymagania klientów oraz środowiskowe wskaźniki projektantów

Środowiskowe wymagania klientów	Środowiskowe wskaźniki projektantów
Redukcja zużycia materiałów w produkcie	Waga produktu
Podatność transportu i przechowywania (DfL)	Objętość produktu
Podatność na wytwarzanie i montaż (DfM, DfA)	Liczba części w produkcie
Mniejsze zużycie energii w całym LCP	Różnorodność i liczba zastosowanych materiałów
Zwiększona trwałość wydłużająca użytkowanie	Podatność na zabrudzenia
Łatwy do ponownego użycia	Wytrzymałość części produktu
Łatwy do demontażu w trakcie użytkowania i w EoL	Fizyczny czas użytkowania produktu
Łatwy do utrzymania w czystości	Liczba zużytej energii w całym PLC
Łatwy do roztrząsania w fazie EoL	Wskaźnik materiałów podatnych na recykling
Łatwy do sortowania (komponenty, materiały itp.)	Masa zanieczyszczeń powietrza w całym PLC
Bezpieczny dla procesu spalania (bez substancji toksycznych)	Ilość generowanych fal związanych z hałasem, wibracjami, polem elektromagnetycznym, podczas użytkowania produktu
Bezpieczny dla procesu składowania	Masa zanieczyszczeń wody w całym PLC
Niegroźny dla fauny i flory w całym PLC	Masa zanieczyszczeń solą w całym PLC
Zapewniający bezpieczne emisje podczas procesów wytwarzania	Biodegradowalność
Produkt umożliwiający swobodne pozbycie się go przez użytkownika	Toksyczność materiałów

**Źródło:** K. Masui, T. Sakao, A. Inaba, *Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1<sup>st</sup> report) a Methodology in Early Stage of DfE, Proceedings, The IEEE Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan 2001, s. 853–854.

W kolejnym kroku Bai i współautorzy zaproponowali etapizację procesu GD, wykorzystując do tego rozszerzoną metodę rozwinięcia funkcji jakości (*Quality Function Deployment* – QFD) poszerzoną o aspekt środowiskowy (*Quality Function Deployment for Enviromental* – QFDE) oraz metodę TRIZ (*Теория Решения Изобретательских Задач* – *Theory of Inventive Problem Solving* – TRIZ) wzbogaconą o kwestie bioniki (BioTRIZ). Sama metoda TRIZ, której twórcą jest Altszuller<sup>49</sup>, stanowi zestaw narzędzi, bazy wiedzy oraz podstawowego modelu technologicznego wykorzystywanych w celu generowania optymalnych rozwiązań.

Nieco inny podział związany z GPD w kontekście DfX zaproponowali Benabdellah i współautorzy<sup>50</sup>. Wskazali oni trzy wymiary, do których przyporządkowali konkretne rozwiązania DfX, tzn. zakresy:

- ekonomiczny (projektowanie wspomagające demontaż – DfD, projektowanie wspomagające regenerację – *Design for Remanufacture* – DfR<sub>em</sub>, projektowanie wspomagające koniec życia produktu na rynku – DfE<sub>ol</sub>),
- ekologiczny (DfR<sub>u</sub>, DfR<sub>c</sub>, DfE<sub>ol</sub>, projektowanie wspomagające logistykę odwrotną – *Design for Reverse Logistics* – DfRL),
- ekosystemu (DfS, DfE, projektowanie redukujące przewlekłe ryzyko – *Design for Chronic Risk Reduction* – DfCRR, projektowanie wspomagające minimalizację zużycia energii – *Design for Energy Conservation* – DfEC, projektowanie wspomagające ochronę materiałową – *Design for Material Conservation* – DfMC).

W tej samej publikacji autorzy dokonują agregacji najnowszych strategii związanych z pojęciem Green, zwracając uwagę na możliwość ich ujęcia od reaktywnego do całościowego, oraz je charakteryzują (tabela 12).

**Tabela 12.** Zielone strategie przedsiębiorstw

Nazwa strategii	Charakterystyka strategii
1	2
<b>Prawnej zgodności defensywnej</b>	Kwestie środowiskowe są uciążliwe dla organizacji, która próbuje działać jedynie w granicach wywiązywania się ze zobowiązań prawnych
<b>Minimalizacji odpadów</b>	Organizacje koncentrują się na minimalizacji generowania odpadów, w sposób reaktywny działając prośrodowiskowo – przyczyny powstawania odpadów nie są analizowane

49 H. Altszuller, *Algorytm wynalazku*, Warszawa 1975.

50 A. Benabdellah, K. Zekhnini, A. Cherrafi, J.A. Garza-Reyes, A. Kumar, *Design for the Environment: An Ontology Based Knowledge Management Model for Green Product Development*, „Business Strategy and The Environment” 2021, vol. 30(8), s. 4040.

Tabela 12 (cd.)

1	2
<b>Wydajności ekologicznej</b>	Maksymalizacja wartości dodanej powstaje poprzez szereg prośrodowiskowych działań, np. minimalizowanie materiałochłonności, wykorzystania recyklingu, eliminację rozpraszania substancji toksycznych, zrównoważonego wykorzystania zasobów odnawialnych czy też zwiększenia trwałości produktów
<b>Zielonego rozwoju produktu – GPD</b>	Ograniczany jest negatywny wpływ całościowego projektu produktu na kwestie środowiskowe – ograniczanie zużycia zasobów nieodnawialnych, minimalizowanie użycia materiałów niebezpiecznych dla środowiska

**Źródło:** A. Benabdellah, K. Zekhnini, A. Cherrafi, J.A. Garza-Reyes, A. Kumar, *Design for the Environment: An Ontology Based Knowledge Management Model for Green Product Development*, „Business Strategy and The Environment” 2021, vol. 30(8), s. 4041.

Jak widać na podstawie zaprezentowanej tabeli, GPD stanowi najdojrzalszą zieloną strategię, która może być realizowana w ramach funkcjonowania organizacji. Podobnie jak Wallat i współautorzy<sup>51</sup> proponują oni schemat projektowania wspomagającego środowisko oparty na wiedzy, wyodrębniając w nim pięć kluczowych obszarów wraz z konkretnymi kryteriami je reprezentującymi:

- względy środowiskowe (np. emisja w środowisku wodnym, biodegradowalność materiałów, zużycie energii w procesach wytwórczych i logistycznych itp.),
- wymagania środowiskowe (np. stabilność i bezpieczeństwo materiałów, ich adekwatność oraz trwałość, wydajność procesu itp.),
- wskaźniki środowiskowe (wyczerpanie naturalnych zasobów, energii, wody, potencjał wpływu na globalne ocieplenie, wpływ na zakwaszenie powietrza itp.),
- kwestie środowiskowe (degradacja krajobrazów, radiacja, ryzyko hałasu, bezpieczeństwo zdrowia, globalne ocieplenie itp.),
- kryteria recyklingu i demontażu (koszty operacji demontażu i części do recyklingu, krytyczne materiały, łatwość recyklingu, ponownego użycia i regeneracji, analiza przyczyn itp.)<sup>52</sup>.

Autorzy zwrócili uwagę na cztery podstawowe grupy barier, do których zaliczyli kategorie ekonomiczne, technologiczne, informacyjne i społeczne, nadając im konkretne wymiary:

<sup>51</sup> P. Wallat, S. Lawrenz, A. Lohrengel, *A Knowledge-based Product...*, s. 4.

<sup>52</sup> A. Benabdellah, K. Zekhnini, A. Cherrafi, J.A. Garza-Reyes, A. Kumar, *Design for the Environment: An Ontology...*, s. 4046.

- ekonomiczny (wszystkie implikacje kosztowe związane produktem w jego całym PLC, np. koszty projektowania, koszty utylizacji lub koszty utraty dostawców),
- technologiczny (brak wiedzy technicznej, odpowiednich technologii, opór przed wdrażaniem zaawansowanych technologii, złożoność projektowania uwzględniającego redukcję zużycia energii itp.),
- informacyjny (brak edukacji i informowania pracowników na temat GPD, brak wiedzy o dobrych praktykach w zakresie „Green”, brak poradników, niewłaściwa komunikacja itp.),
- organizacyjny (kultura, wiedza i zasoby organizacyjne nie są adekwatne do wyzwań związanych z GPD, konkurencja rynkowa, ograniczone zasoby ludzkie, złożoność łańcuchów dostaw itp.)<sup>53</sup>.

Podobnie jak poprzedni autorzy Batwara i inni<sup>54</sup> wskazali cztery podstawowe bariery GPD, które skategoryzowali według identycznego układu. Nieco inaczej do tego zagadnienia odnieśli się Coutinho i współautorzy, dzieląc zielone praktyki na sferę kierowniczą (zarządczą) i operacyjną<sup>55</sup>. Do sfery zarządczej zaliczyli:

- zarządzanie strategiczne integrujące kwestie środowiskowe w procesach podejmowania decyzji,
- kwestie regulacji i obowiązującego prawa (zgodność działania organizacji z prawem i obowiązującymi regulacjami),
- edukację i szkolenia zorientowane na tematykę *Green*,
- logistykę odwrotną ukierunkowaną szczególnie na fazę EoL PLC,
- multidyscyplinarność pozwalającą na horyzontalną współpracę w ramach zielonych praktyk,
- planowanie i kontrola produktów oraz procesów szczególnie w kontekście celów środowiskowych,
- zielone zarządzanie łańcuchem dostaw (*Green Supply Chain Management* – GSCM) doskonalące wartość środowiskową produktu,
- integrację z klientami w postaci prowadzenia polityki informacyjnej w zakresie środowiskowych aspektów produktów oraz rekomendacji w ostatniej fazie PLC – EoL,
- wdrożenie międzynarodowych standardów bazujących na systemach ISO serii 14000.

<sup>53</sup> Tamże, s. 4048.

<sup>54</sup> A. Batwara, V. Sharma, M. Makkar, A. Giallanza, *An Empirical Investigation of Green Product Design and Development Strategies for Eco Industries Using Kano Model and Fuzzy AHP*, „Sustainability” 2022, vol. 14(8735), s. 4.

<sup>55</sup> R. Coutinho, P. Ceryno, L. Campos, M. Bouzon, *A Critical Review on Lean Green Product Development: State of Art and Proposed Conceptual Framework*, „Environmental Engineering and Management Journal” 2019, vol. 18(11), s. 2325.

W sferze operacyjnej zwrócono uwagę na cztery podstawowe elementy, czyli:

- minimalizację zużycia materiałów i energii,
- minimalizację wpływu środowiskowego zasobów i procesów,
- optymalizację długości życia produktu,
- wydłużanie żywotności użytych w produktach materiałów.

Ci sami autorzy wskazali także główne czynniki wpływające na GPD. Zaliczyli do nich:

- zdobycie przewagi konkurencyjnej poprzez wdrożenie GPD,
- zrównoważony rozwój (poprawa wizerunku organizacji),
- innowacje poszerzające prace R&D&I,
- zaangażowanie najwyższego kierownictwa w rozwój prośrodowiskowych praktyk,
- politykę organizacji w kwestii odpowiadania na pytania konsumentów związane z GPD,
- popyt na rynku i presję interesariuszy szczególnie podczas wdrażania zielonych rozwiązań,
- przepisy ustawowe i wykonawcze – wiele krajów wprowadza rozwiązania sprzyjające działaniom na rzecz GPD<sup>56</sup>.

Wspomniani już Batwara i współautorzy w swoich badaniach zidentyfikowali także 22 oczekiwane cechy GPD, które podzielili na pięć podstawowych grup, tzn.:

- zaangażowanie najwyższego kierownictwa (szkolenia pracowników w kierunku GPD, inwestycje wspierające „zieloną” orientację organizacji, promowanie, wsparcie przez menadżerów najwyższego szczebla działań związanych z GPD w ramach obszarów R&D&I),
- projektowanie wspomagające środowisko – DfE, projektowanie wspomagające demontaż, projektowanie wspomagające możliwość utylizacji – *Design for Disposability* (DfDsp), projektowanie wspomagające efektywność energetyczną – *Design for Energy Efficiency* (DfEE), projektowanie wspomagające recykling i ponowne użycie – *Design for Recycling and Reuse* (DfR<sub>c us</sub>), projektowanie wspomagające ochronę i optymalne wykorzystanie zasobów (zawierające w sobie DfMC) – *Design for Conservation and Optimal Utilization of Resources* – *Design for Resources* (DfR<sub>sc</sub>)<sup>57</sup> oraz ocena środowiskowego wpływu PLC,
- wykorzystanie „zielonych technologii” – komputerowe wspomaganie zarządzania obiektami (*Computer Aided Facility Management* (CAF, CAD, CAM, CIM), komputerowe wspomaganie testowania – *Computer Aided Testing* (CAT),
- zielone zarządzanie zewnętrznym łańcuchem dostaw (zielone zakupy, zielony marketing, logistyka odwrotna, zaangażowanie się dostawców i użytkowników w zielone wytwarzanie),

<sup>56</sup> Tamże, s. 2326.

<sup>57</sup> DfR<sub>sc</sub> powinno zawierać w sobie DfMC.

- zielone zarządzanie wewnętrznym łańcuchem dostaw (zielone/zrównoważone wytwarzanie, gospodarka odpadami, system zarządzania środowiskowego, zielone pakowanie i opakowania)<sup>58</sup>.

Zaprezentowane czynniki odnoszą się w szerszym stopniu, aniżeli w przypadku PD w kontekście SD oraz CE, do kwestii zarządzania całą organizacją oraz jej współpracą z otoczeniem zewnętrznym. Autorzy podkreślają tutaj kwestie zarządzania różnymi funkcjonalnymi obszarami organizacji w kontekście ich zielonego podejścia. Nie zmienia to jednak faktu, że można znaleźć tutaj wiele wspólnych elementów łączących koncepcje równowagi/obiegu zamkniętego/zieloną.

Luan i współautorzy<sup>59</sup> rozszerzają zagadnienie GPD o pojęcie „zielonej” kreatywności (*Green Creativity* – GC) definiowanej jako rozwój nowych pomysłów w nowym, zielonym wymiarze w stosunku do produktów, usług i praktyk. Oczywiście sama kreatywność nie należy tylko do pracowników, ale ma także swój organizacyjny potencjał, stwarzając cały zaprojektowany i zorganizowany układ różnorodnych elementów (system) wspierający tego typu działania. Oprócz GC zbadali oni także wpływ dynamicznych zielonych zdolności organizacyjnych, zielonego, transformującego organizację przywództwa oraz reaktywnych i proaktywnych zielonych innowacji na wydajność GPD. Ta ostatnia została zdefiniowana przez autorów jako zdolność do tworzenia produktów o zmniejszonym negatywnym wpływie na środowisko oraz zmniejszonej szkodliwości dla ludzkiego zdrowia. Weryfikacja wszystkich postawionych przez badaczy hipotez przebiegła pozytywnie, co pozwala wzbogacić teorię GPD o kolejne pojęcia. Badania nad GC przeprowadzili także Aeknarajindawat i Jernsittiparsert, starając się uchwycić pośredniczącą rolę GC w relacji pomiędzy zielonymi innowacjami proaktywnymi i reaktywnymi<sup>60</sup>.

Jasti i współautorzy zaproponowali grupę czynników, która składa się na GPD<sup>61</sup>. Fundamentem całej koncepcji w przedsiębiorstwie mają stać się zaangażowanie interesariuszy oraz konkretnie zdefiniowana misja oraz wizja organizacji. Na tym fundamencie znajduje się szereg obszarów, które ostatecznie pozwalają osiągnąć GPD. Można do nich zaliczyć:

- system zarządzania środowiskowego,
- ocenę PLC,
- planowanie produktu i procesu oraz ich kontrola,

58 A. Batwara, V. Sharma, M. Makkar, A. Giallanza, *An Empirical Investigation of Green...*, s. 8–15.

59 N. Luan, D. Hau, N. Thu, *The Influence of Green Product Development Performance to Enhance Enterprise Effectiveness and Innovation*, „Economies” 2022, vol. 10(113), s. 2.

60 N. Aeknarajindawat, K. Jernsittiparsert, *The Mediating Role of Green Creativity in the Relationship between Proactive Green Innovation, Reactive Green Innovation and the Performance of Green Product Development: A Case of Thai Sports Manufacturing Firms*, „Journal of Human Sport and Exercise” 2019, vol. 14(5), Supplementary Issue: Summer Conferences of Sports Science. First International Conference in Iraq on Sport for Peace”, s. 2294–2295.

61 N. Jasti, A. Sharma, S. Karinka, *Development of a Framework for Green Product Development*, „Benchmarking-An International Journal” 2015, vol. 22(3), s. 439.

- zieloną konsumpcję,
- zielone zarządzanie łańcuchem dostaw,
- zarządzanie marketingiem,
- technologie/systemy/narzędzia,
- zielone wytwarzanie,
- projektowanie wspomagające środowisko (DfE),
- zarządzanie strategiczne.

Dziesięć zaprezentowanych elementów umożliwia wdrożenie GPD, choć należy obiektywnie przyznać, że wydają się one niepełne. Nie ma tutaj np. mowy o logistyce odwrotnej pomimo pojawienia się pojęcia zielonego łańcucha dostaw, którego definicja literaturowa bywa różna. Wydaje się, że problem GPD nie dotyczy tylko danej organizacji, ale całego działającego systemu bazującego na gospodarce liniowej. Jego przedstawienie wymaga pewnej masy krytycznej przedsiębiorstw, które wymusiłyby konieczność zielonych zmian w innych organizacjach.

Kolejni autorzy, He i Li<sup>62</sup>, podjęli próbę określenia relacji pomiędzy projektowaniem produktów oraz SD, zamykając to w ramy pojęciowe zielonego projektowania produktu (GD). W ramach metod zielonego projektowania produktu wskazują oni następujące rozwiązania:

- metoda projektowania cyklu życia,
- metoda projektowania równoległego (PE),
- metoda projektowania modułowego,
- projektowanie wspomagające demontaż (DfD).

Lista zaprezentowanych przez autorów metod wydaje się dość krótka na tle dotychczasowych rozważań literaturowych i z pewnością powinna zostać uzupełniona o dodatkowe metody, narzędzia i techniki.

Ren i Cai<sup>63</sup> słusznie zauważają, że GPD nie jest związany tylko z przemysłem. Zielone podejście do życia to przede wszystkim zmiana zachowań konsumentów, ich sposobu funkcjonowania oraz przyzwyczajzeń w konsumowaniu wyrobów (inne czynniki determinujące zakup, inne podejście w kwestii użytkowania oraz aktywnego uczestniczenia w końcu cyklu życia produktu), ale także i gruntowne zmiany związane z polityką państw i gospodarek. Promowanie zrównoważonego rozwoju oraz ochrony środowiska naturalnego wymaga przebudowy dotychczasowych, często egoistycznie i egocentrycznie ustawionych społeczeństw oraz ich edukację. Ponieważ z pewnością jest to proces rozłożony w latach, rola projektantów w ramach GPD powinna koncentrować się na odnalezieniu kompromisu pomiędzy samym projektem, społeczeństwem, w tym jego kulturą, oraz środowiskiem.

62 W. He, W. Li, *Research on Green Product Design and Sustainable Development*, „Advances in Economics, Business and Management Research” 2017, vol. 48, s. 123–124.

63 C. Ren, C. Cai, *Sustainability of Green Product Design Teaching and Research*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Social Science, Humanities, and Management (ASSHM 2014), Guangzhou, China 2014, s. 356–357.



Autorzy także wskazują na zestaw rozwiązań w ramach metody projektowania zielonego życia produktów (*Green Life Product Design Method GLPD*), zaliczając do nich:

- koncepcję projektowania skoncentrowaną na innowacyjnych źródłach wytwarzania, akumulowania i transferowania energii,
- koncepcję projektowania urządzeń energooszczędnych,
- koncepcję projektowania uwzględniającą recykling i zielone materiały,
- koncepcję projektowania uwzględniającą modułowość<sup>64</sup>.

Wśród analizowanej literatury pojawia się także grupa publikacji dotyczących oceny wybranych aspektów GPD w kontekście środowiskowym. Ng i Tang<sup>65</sup> zauważają, że proces decyzyjny związany ze środowiskową oceną nie bazuje jedynie na ocenie aspektów środowiskowych. Wspomniani autorzy zaproponowali np. ocenę opcji projektowych dla GPD na podstawie algorytmu kukulek, czyli metaheurystycznym algorytmem inspirowanym zachowaniem lęgowym kukulek (*Cuckoo Search Algorithm – CSA*), w którym optymalne rozwiązanie uzyskuje się poprzez losowe wyszukiwanie po iteracji algorytmu. Autorzy wspominają także o innych algorytmach, np. kolonii mrówek (bazuje na wzorcu komunikacji pomiędzy mrówkami), kolonii pszczół (zachowanie pszczół) czy też optymalizacji roju cząstek, inspirowanej zachowaniami ławicy ryb. W algorytmie CSA symulowane są zachowania lęgowe kukulek, składających jaja (reprezentujące konkretne rozwiązanie) w obcych gniazdach, czyli generujących pewną liczbę pomysłów, które następnie przez porównanie wartości wyjściowej funkcji celu pozwalają wybrać najlepsze wyjście.

Zaprezentowane trzy konteksty PD, tzn. zrównoważony rozwój, gospodarka cyrkularna oraz zielone projektowanie, stwarzają pewien dysonans poznawczy. Trudno bowiem jest uchwycić na tle przytoczonych publikacji różnice między tymi pojęciami. Co więcej, w przytaczanych pozycjach literaturowych pojawiają się dodatkowe pojęcia, np. ekoprojektu (ED), projektowania wspomagającego środowisko (DfE), ekologicznie świadomego projektowania (*Environmentally Conscious Design – ECD*), zielonej inżynierii (GE), zrównoważonego projektowania cyklu życia (*Sustainable Life-Cycle Design – SLCD*), zrównoważonego rozwoju produktu (SPD).

Johansson i Sundin<sup>66</sup> wskazali przykłady terminologii wybranych pojęć, wykorzystywanych w ramach GPD, starając się ten problem w pewien sposób usystematyzować (tabela 13), choć należy obiektywnie przyznać, że z przytoczonych definicji nie wynika wyraźnie uporządkowany obraz terminologii projektowania i rozwoju produktu w ramach obszaru środowiskowego.

64 Tamże, s. 354–355.

65 C. Ng, W. Tang, *Evaluation of Design Options for Green Product Development: A Combined Cuckoo Search and Life Cycle Assessment Approach*, „International Journal of Life Cycle Assessment” 2022, vol. 27(5), s. 667.

66 G. Johansson, E. Sundin, *Lean and Green Product Development: Two Sides of The Same Coin?*, *Journal of Cleaner Production* 2014, vol. 85, s. 106–107.

Tabela 13. Przykłady terminologii i definicji GPD

Definicja	Terminologia	Autor
<b>Zielone projektowanie produktu</b>	Zajmuje się kwestiami środowiskowymi poprzez projektowanie i innowacje	Chen (2001)
<b>Ekoprojekt</b>	Ekoprojektowanie wiąże się z podjęciem działań podczas procesu projektowania i rozwoju produktu, których celem jest minimalizacja negatywnego wpływu produktu na środowisko naturalne podczas jego całego cyklu życia, bez uszczerbku dla kluczowych kryteriów projektowanego produktu, takich jak koszt lub wydajność	Johansson (2002)
<b>Ekologicznie świadome projektowanie</b>	Działania projektowe, których celem jest redukcja negatywnego wpływu środowiskowego przez cały cykl życia wyrobu z zachowaniem wymagań rynku	Sako (2009)
<b>Projektowanie wspomagające środowisko</b>	DfE jest szeroko rozumianą koncepcją edukacyjną i przemysłową, integrującą rozważenie działań prośrodowiskowych w procesie projektowania produktu oraz w samym produkcie	Boks i Stevels (2007)

**Źródło:** G. Johansson, E. Sundin, *Lean and Green Product Development: Two Sides of The Same Coin?*, „Journal of Cleaner Production” 2014, vol. 85, s. 108.

Podsumowując zaprezentowany przegląd literatury, można stwierdzić, że kwestie PD w obszarze środowiskowym na chwilę obecną sprowadzają się bądź to do operacyjnych rozwiązań wybranych elementów PLC, bądź też teoretycznych modeli, które napotykają na szereg barier, np. świadomości konsumentów czy też archaicznych modeli biznesowych nastawionych na maksymalizację zysku.

Zaprezentowany materiał stanowi jednak bogaty zasób wiedzy, który w najbliższym czasie może stać się głównym drogowskazem zmian zachodzących w projektowaniu wyrobów. Drugim z kierunków, w którym należałoby się udać, mając na uwadze kwestie nowoczesnego projektowania produktu, jest czwarta rewolucja przemysłowa z technologiami, mogącymi wkrótce zmienić klasyczny świat projektowania i wytwarzania stworzony przez drugą i trzecią rewolucję przemysłową. Zagadnienia te zostaną poruszone w kolejnym rozdziale.

## Rozdział 4

# Projektowanie i rozwój produktu w ramach obszaru technologicznego

Rozwój technologiczny w trzeciej dekadzie XXI wieku stwarza dotychczas nieznane możliwości, a połączenie najnowszych technologii w strategię rozwoju przemysłu Hi-Tech – I 4.0 pozwala postawić tezę, że przyszłość przemysłu będzie ograniczona barierami wynikającymi z ograniczeń ludzi lub sztucznej inteligencji.

Na chwilę obecną wytwarzanie addytywne (AM), systemy cyberfizyczne (CFS), Internet Rzeczy (IoT), wirtualna (VR) i poszerzona rzeczywistość (AR) oraz inne technologie będące fundamentami I 4.0 są wdrażane operacyjnie w wybrane fragmenty przemysłu, raczej w sposób adoptujący je do dotychczasowego modelu funkcjonowania organizacji, aniżeli w sposób łamiący dotychczasowe paradygmaty działania przedsiębiorstw.

Podobnie rzecz się ma w procesie projektowania i rozwoju produktu (PD), w którym konkretne technologie I 4.0 wspomagają bądź to poszczególne procesy, bądź też kolejne etapy procesu projektowania. Zasadne wydaje się zatem zaprezentowanie najnowszych trendów w tym zakresie na podstawie zebranych z ostatniego okresu publikacji.

### 4.1. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście technologii I 4.0

Czwarta rewolucja przemysłowa wraz z rozwojem technologii ją napędzających staje się ważnym momentem dla świata projektowania i rozwoju produktów. Dzieje się tak dlatego, że zaproponowane przez I 4.0 technologie w większości przypadków

są w fazie ich dynamicznego rozwoju, co skutkuje tym, że w zasadzie oprócz pewnych wizji i weryfikowanych naukowych koncepcji bardzo trudno jest ostatecznie stwierdzić, jak ma wyglądać inteligentna fabryka (*Smart Factory* – SF), inteligentny produkt (*Smart Product* – SP) czy też inteligentny przemysł (*Smart Industry* – SI). Tym bardziej wskazany jest przegląd dotychczasowych trendów związanych PD i pojęciem Industry 4.0.

Ahmed ze współautorami zauważa konieczność wprowadzenia systemu inteligentnego i wirtualnego rozwoju produktu (*Smart Virtual Product Development* – SVPD) jako rozwiązania usprawniającego wytwarzanie wyrobów, które ma sprostać ciągłym zmianom na rynku, funkcjonowaniu krótkich cykli życia produktów czy też wzrastającym wymaganiom klienta dotyczącym podnoszenia jakości wyrobów, które oferowane byłyby po coraz niższej cenie<sup>1</sup>.

Opracowany przez wspomnianych autorów system SVPD składa się z trzech podstawowych modułów:

- zarządzania wiedzą projektową,
- analizy zasobów produkcyjnych i planowania procesów,
- planowania kontroli produktów.

Każdy z trzech modułów wchodzi w interakcję z modulem, w którym podejmowane są decyzje dotyczące rozwoju produktu, bazującym na ustrukturalizowanym zestawie doświadczeń wiedzy (*Set of Experience Knowledge Structure* – SOEKS). Ten w swojej prostszej formie zestawu doświadczeń (*Set of Experience* – SOE) opiera się na czterech podstawowych komponentach, tzn.: zmiennych, funkcjach, ograniczeniach oraz zasadach (zmienne definiują funkcje SOE, kiedy te tworzą relacje pomiędzy zmiennymi, będąc wykorzystywanymi do rozwoju wielozadaniowych celów, ograniczenia pozwalają czynić rozwiązania wykonalnymi, a zasady stanowią logiczne połączenia pomiędzy zmiennymi)<sup>2</sup>. Grupy SOE wytwarzają chromosomy reprezentujące specyficzne obszary w ramach danego obszaru decyzyjnego, gromadząc strategię decyzyjne dla danego obszaru. Precyzyjne, ustrukturyzowane i pogrupowane zestawy decyzyjnych chromosomów tworzą tzw. decyzyjne DNA – DDNA<sup>3</sup>. Gromadzona w taki sposób wiedza praktyczna staje się ważnym wspomaganiem pracy projektanta.

Koncepcyjny model zalecanych ram decyzyjnych zaprezentowali Jaiswal i współautorzy<sup>4</sup>. Uznali oni, że w obszarze projektowania i rozwoju inteligentnych

- 
- 1 M. Ahmen, C. Sanin, E. Szczerbicki, *Smart Virtual Product Development (SVPD) to Enhance Product Manufacturing in Industry 4.0*, „Procedia Computer Science” 2019, vol. 159, s. 2232.
  - 2 M. Ahmen, F. Majeed, C. Sanin, E. Szczerbicki, *Enhancing Product Manufacturing through Smart Virtual Product Development (SVPD) for Industry 4.0*, „Cybernetics and Systems” 2020, vol. 51(2), s. 249–250.
  - 3 M. Ahmen, S. Shafiq, C. Sanin, E. Szczerbicki, *Towards Experience-Based Smart Product Design for Industry 4.0*, „Cybernetics, and Systems: An International Journal” 2019, vol. 50(2), s. 167.
  - 4 A. Jaiswal, R. Basu, P. Bholia, *Proposed Decision Framework for Smart Product Development in Industry 4.0: An Indian Perspective*, Proceedings, 6<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision, and Information Technologies (CoDIT’19), Paris, France 2019, s. 32.

produktów (*Smart Product Development* – SPD) istnieje pięć podstawowych wymiarów, do których zaliczyli:

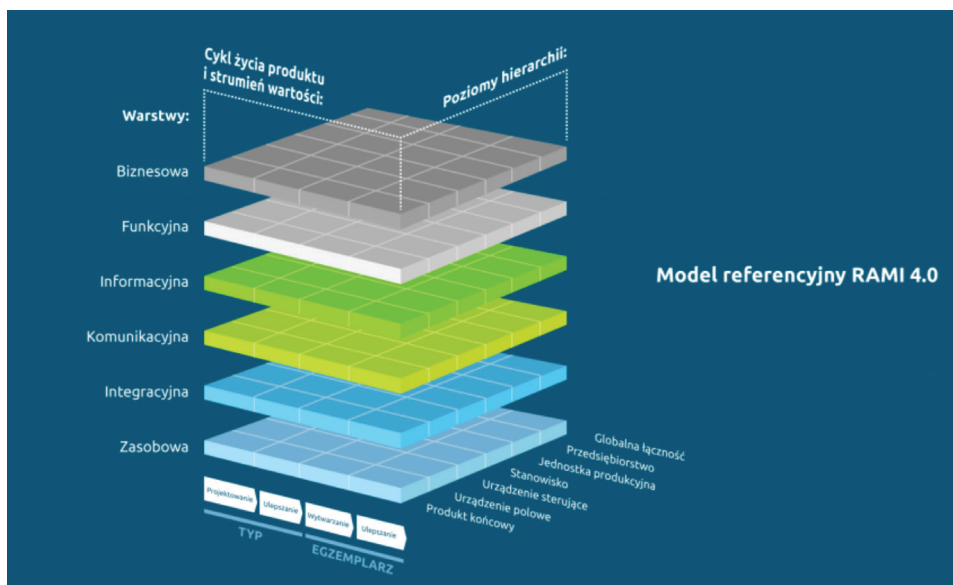
- integrację systemu – zmechanizowana droga interakcji pomiędzy obiektami fizycznymi a oprogramowaniem, która pozwala różnorodnym komponentom na wchodzenie we wzajemne interakcje w porządku wymiany informacji; inteligentne sieci bazujące na systemach cyberfizycznych (CBS), interakcje sieciowe zaprojektowane i rozwijane z wykorzystaniem wejściowych i wyjściowych danych fizycznych dla dostarczania usług, interakcje człowiek–sprzęt w ramach CPS,
- inżynierię opartą na współpracy – współpraca przy inżynierii produkcji z udziałem rozproszonych interesariuszy; rozproszone zespoły mogą planować, monitorować i zarządzać projektami inżynieryjnymi, rozwijać modele biznesowe, aby dostarczać wartość dla klientów, zintegrowane w system chmury obliczeniowej, pozyskania surowców, recyklingu, regeneracji, rozwoju produktu, odzyskiwania oraz infrastruktury logistyki utylizacji,
- technologie i innowacje – łatwo dostępne świadczenie usług wykorzystujące technologie Webowe oraz Internet Rzeczy (IoT); połączenie inteligentnych maszyn, zaawansowanej analityki predyktywnej oraz człowieka i maszyny, zdolność wykrywania w czasie rzeczywistym, szybkie przechwytywanie danych ułatwiające zdalną produkcję, współpraca interesariuszy połączonych mediami społecznościowymi, harmonizacja produktu i przepływu informacji, analityka dużych zbiorów danych (BDA) w celu uzyskiwania praktycznych spostrzeżeń,
- odchudzone systemy operacyjne – łączenie zasad I 4.0 z koncepcją odchudzonego zarządzania (*Lean Management* – LM); oddziaływanie na trzy aspekty, czyli na systematyczność, transparentność i powtarzalność procesów, czynienie procesów stabilnymi, czystymi i elastycznymi, wykorzystanie w doskonaleniu jakości i przejrzystości informacji danych w czasie rzeczywistym, tworzenie wzajemnych współzależności oraz wzmocnień,
- perspektywę zrównoważenia w aspektach ekonomicznych, środowiskowych, społecznych – przyspiesza obniżanie kosztów produkcji, co skutkuje pojawianiem się wartości dodanej, zmniejsza ilość odpadów, surowców oraz zużycia energii, ogranicza emisję gazów cieplarnianych poprzez analizę śladu węglowego; właściwa ocena wynagrodzeń, edukacji pracowników oraz poziomu motywacji do pracy<sup>5</sup>.

Zaprezentowana koncepcja SPD zwraca uwagę na dość istotne kwestie. Bazuje ona jednak na dotychczasowych paradygmatach (jak choćby koncepcji LM), eksponując aspekty, które w projektowaniu produktu zawsze były istotne, np. integrację systemów, inżynierię opartą na współpracy czy też rozwoju technologii i innowacjach. Dość ciekawym elementem, który pojawia się już nie po raz pierwszy w kontekście I 4.0, jest kwestia zrównoważonego rozwoju różnych aspektów aktywności

5 A. Jaiswal, R. Basu, P. Bhola, *Proposed Decision Framework for Smart...*, s. 632.

organizacyjnej, które wydają się istotną regułą w kontekście omawiania zagadnienia projektowania i rozwoju produktu 4.0 (PD 4.0).

Jeśli chodzi o koncepcję odchudzonego wytwarzania LM<sub>p</sub>, Hunag oraz współautorzy zaprezentowali wyniki jej połączenia z dynamicznym mapowaniem strumienia wartości<sup>6</sup>. Autorzy, wychodząc od redukcji marnotrawstwa, zaproponowali w zasadzie rozwiązanie typu CAD, pozwalające dynamicznie optymalizować projekt w kontekście redukcji zużycia materiałów oraz redukcji odpadów. W swoich założeniach zwrócili uwagę na całościowy proces przepływu materiałów wykorzystywanych do końcowego montażu konkretnych elementów, a w kwestii wdrażania technologii lub zasad I 4.0 zaproponowali wykorzystanie modelu architektury referencyjnej produktu 4.0 (*Reference Architecture Model Industry 4.0* – RAMI4.0) bazującej na integracji trzech podstawowych wymiarów, tzn.: integracji pionowej, poziomej oraz ocenie cyklu życia produktu (rysunek 32).



**Rysunek 32.** Model architektury referencyjnej 4.0 – RAMI4.0

**Źródło:** <https://elearning.przemyslprzyszlosci.gov.pl/slownik-pojec/referencyjny-model-architektury-przemyslu-4-0-rami4-0/> [dostęp: 11.07.2023].

Model ten wykorzystuje trzy standardy:

- IEC 62890 – Standard zarządzania cyklem życia systemów i komponentów – Pomiary, sterowanie i automatyzacja procesów przemysłowych,

6 Z. Huang, C. Jowers, D. Kent, A. Dehghan-Manshadi, M. Dargusch, *The Implementation of Industry 4.0 in Manufacturing: From Lean Manufacturing to Product Design*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2022, vol. 121(5–6).



- IEC 62264 – Standard integracji systemów kontroli w przedsiębiorstwie,
- IEC 61512 – Standard regulujący procesy wsadowe.

Idea modelu opiera się na umożliwieniu stworzenia mapy, która pozwala zbudować relacje względem siebie różnorodnych elementów lub procesów I 4.0. Warstwy zasobów i integracji reprezentują fizyczny świat, oddzielony od niematerialnego świata komunikacji i informacji. Warstwy funkcjonalne oraz biznesowe bazujące na komunikacyjnej sferze BDA mają możliwość wykorzystywania systemów planowania zasobów przedsiębiorstwa (ERP) w celu analizowania, przewidywania oraz podejmowania decyzji. Oś strumienia wartości i cyklu życia (podlegająca systemowi IEC 62890) podzielona jest na dwie części – oś typu reprezentująca produkt w formie abstrakcyjnej oraz oś egzemplarza pokazująca fizycznie wytwarzany produkt. W kolejnej warstwie zaczynającej się produktem, który podlega całkowitemu śledzeniu i gromadzeniu danych o produktach w czasie rzeczywistym, istnieje możliwość optymalizacji całego łańcucha wartości produktu, a także identyfikacji potrzeb klientów. Nad tą warstwą czuwają standardy IEC 62890 oraz IEC 61512. Kończy ją połączenie produktu z rynkiem w formule globalnej łączności<sup>7</sup>.

Loganathan zwraca uwagę na kwestię zwinności produktu realizowanej przez właściwe jego projektowanie w erze I 4.0, stawiając tezę, że poprzez wdrażanie czynników aktywujących rozwój I 4.0 osiągnąć można także wdrożenie masowej kastomizacji. Autor wskazał trzy technologie I 4.0, tzn. IoT, CPS oraz wytwarzanie w chmurze (*Cloud Manufacturing* – CM) odnoszące się do wykorzystania i przetwarzania przez organizację znajdujących się w chmurze obliczeniowej lub podobnych systemach danych, pozwalające realizować konkretne procesy w ramach udostępnianych usług. Uzupełnił je następnie o wytwarzanie addytywne (*Additive Manufacturing* – AM), analitykę dużych zbiorów danych (BDA), uczenie maszynowe (ML) czy też wykorzystanie siłowników, sensorów bądź komunikacji RFID<sup>8</sup>. Loganathan w prezentowanym w dalszej części artykułu studium przypadku projektowania monoblokowej pompy odśrodkowej przy wykorzystaniu narzędzi typ CAD wskazał możliwości jej podłączenia z aplikacją mobilną oraz z nowymi możliwościami użytkowymi z tego wynikającymi. Oceniając zaprezentowane rozwiązanie, można powiedzieć, że poza dodaniem kilku dodatkowych funkcjonalności oraz poprawą niektórych elementów ergonomicznych wyrób gotowy daleki jest implementacji technologii I 4.0.

Naeem oraz Di Maria przedstawiają w swoim artykule koncepcję współuczestniczenia konsumentów w NPD z perspektywy I 4.0<sup>9</sup>. W ramach istniejących definicji i perspektyw I 4.0 autorzy zwracają uwagę na dziewięć głównych punktów wynikających z wybranych definicji I 4.0 i zaliczają do nich:

7 Tamże, s. 3353.

8 G. Loganathan, *Agility through Product Design in The Era of Industry 4.0*, „International Journal of Early Childhood Special Education” 2022, vol. 14(02), s. 3752.

9 H. Naeem, E. Di Maria, *Customer Participation in New Product Development: An Industry 4.0 Perspective*, „European Journal of Innovation Management” 2020, vol. 25(6), s. 637–655.



- 1) cyfryzację produkcji,
- 2) krzyżowanie się produkcji i technologii,
- 3) działania w ramach łańcucha dostaw,
- 4) efektywność procesów podejmowania decyzji,
- 5) kastomizację oraz czas wytwarzania,
- 6) aspekty społeczne, środowiskowe i ekonomiczne,
- 7) połączenia świata fizycznego ze światem wirtualnym,
- 8) połączenia różnorodnych nowych koncepcji,
- 9) kreowanie wartości oraz nowe modele biznesowe<sup>10</sup>.

Autorzy wskazują także najbardziej znaczące technologie I 4.0, zaliczając do nich AM oraz druk 3D (*3D Printing* – 3D-p), AR, robotykę, IoT oraz BD. W przeprowadzonych badaniach stwierdzają, że przedsiębiorstwa wykorzystujące więcej technologii I 4.0 pozwalają zwiększać udział klientów w procesie PD. Połączenie technologii cyfrowych z fizycznymi procesami ułatwia z pewnością wykorzystywanie klientów w procesach projektowania i produkcji wyrobów. Połączenie komponentów fizycznych z ich cyfrowymi bliźniakami zwiększa dostępność informacji o produktach, co powoduje wzrost ich wpływu na tworzenie wartości towaru. Wykorzystanie zatem połączonych technologii I 4.0 wspomaga organizacje w dostarczaniu bardziej spersonalizowanych produktów. Autorzy podkreślają także, że przy tak zaawansowanych technologiach informatyczno-komunikacyjnych (*Information and Communication Technology* – ICT) mocno wzrasta rola klientów w kształtowaniu oferty przedsiębiorstwa i samych produktów. Podsumowując ich spostrzeżenia, należy się zgodzić, że efekt synergii we wdrażaniu technologii I 4.0 jest niezaprzeczalny<sup>11</sup>.

Nascimento oraz Cessa wśród dodatkowych technologii, wywodzących się z I 4.0 i wartych odnotowania w procesie PD, oprócz AM, IoT i CPS wymieniają także sztuczną inteligencję (AI) oraz biologię syntetyczną (*Synthetic Biology* – SB)<sup>12</sup>. SB rozumiane jest tutaj jako połączenie wysiłków z tak różnych obszarów wiedzy jak biologia, chemia czy też informatyka w celu tworzenia nowych lub modyfikacji już istniejących systemów biologicznych. Autorzy zwracają także uwagę na pojęcie „głosu produktu” (*The Voice of The Product* – VoP), który pozwala produktom komunikować się z ich wytwórcami, dzięki czemu może następować ciągły proces doskonalenia towarów.

Nunes oraz współautorzy zwracają uwagę na kwestie rozwoju inteligentnych produktów (SPD) w kontekście podejścia do I 4.0<sup>13</sup>. Nawiązując do Muhlhausera<sup>14</sup>, dokonują kategoryzacji SP w trzech wymiarach:

10 Tamże, s. 640.

11 Tamże, s. 649.

12 J. Nascimento, A. Cessa, *Use of Industry 4.0 Concepts to Use the „Voice of the Product” in the Product Development Process in the Automotive Industry*, „Product Lifecycle Management. The Case Studies” 2019, vol. 4, s. 227.

13 M. Nunes, A. Pereira, A. Alves, *Smart Products Development Approaches for Industry 4.0*, „Procedia Manufacturing” 2017, vol. 13.

14 M. Mühlhäuser, *Constructing Ambient Intelligence*, Darmstadt 2007.

- samego produktu (świadomości jego charakterystyki, funkcjonalności oraz historii),
- środowiska produktu (możliwości wchodzenia produktu w interakcje z otaczającym go środowiskiem, ale także z jego wewnętrznymi komponentami),
- użytkowników produktu (możliwości wchodzenia w interakcje z użytkownikami produktu podczas całego cyklu jego życia, dostarczanie informacji o aktualnym statusie towaru oraz jego utrzymaniu).

Autorzy zauważają, że wartość SP rozszerza się poza strefę fizyczną na szeroką gamę interesariuszy cyfrowych – klientów, uczestników łańcucha dostaw, serwisantów itp., co pozwala śledzić jego cykl życia<sup>15</sup>.

Z kolei Palsodkar oraz współautorzy skupiają się na kwestiach zwinnego rozwoju produktu (*Agile New Product Development* – ANPD), wykorzystującego technologie I 4.0 oraz ocenianego w kontekście przenikania i wpływu tych działań na zrównoważony rozwój (SD)<sup>16</sup>. Autorzy wśród technologii I 4.0 wykorzystywanych w ramach NPD, oprócz tych wskazanych już wcześniej przez poprzednich badaczy, wyróżnili jeszcze wirtualne prototypowanie (*Virtual Prototyping* – VP), oprogramowanie do zaawansowanego dopasowywania kolorów, symulacje i technologie kognitywne (*Simulation and Cognitive Technologies* – SCT), systemy eksperckie (*Expert System* – ES), modelowanie parametryczne oraz symulacje numeryczne<sup>17</sup>.

Następnie autorzy podjęli próbę pokazania, w jaki sposób I 4.0 oraz ANPD będą wpływać na pięć biznesowych SDG oraz jakie są obecnie w literaturze dostępne mierniki i wskaźniki. Wśród pięciu SDG znalazły się:

- SDG7 – dostępna i czysta energia (działania: redukcja zużycia zasobów, zapewnienie bezpiecznych miejsc pracy, doskonalenie efektywności energetycznej, wsparcie w osiągnięciu optymalizacji cyklu życia energii, przyjęcie nowych praktyk i technologii; wskaźniki: redukcja emisji dwutlenku węgla, liczba urządzeń z inteligentnymi systemami energetycznymi, produkty promujące odnawialne źródła energii, liczba zastosowanych materiałów niebezpiecznych),
- SDG8 – godna praca i wzrost gospodarczy (działania: wykorzystanie szansy na wzrost gospodarczy, tworzenie miejsc pracy, projektowanie produktów przyjaznych środowisku, upodmiotowienie pracowników; wskaźniki: wzrost udziału w rynku nowych produktów, wskaźnik rotacji kadry, relacja wieku do płac pracowników, wskaźnik zwrotu z inwestycji (ROI) dla NPD, liczba wygenerowanych możliwości zatrudnienia),
- SDG9 – przemysł, innowacje i infrastruktura (działania: ANPD oraz I 4.0 pozwalające osiągnąć jakość poprzez zrównoważoną infrastrukturę, ciągła

15 M. Nunes, A. Pereira, A. Alves, *Smart Products Development...*, s. 1218.

16 M. Palsodkar, G. Yadav, M. Nagare, *Integrating Industry 4.0 and Agile New Product Development Practices to Evaluate the Penetration of Sustainable Development Goals in Manufacturing Industries*, „Journal of Engineering Design and Technology” 2023, vol. 22(4).

17 Tamże, s. 6.

modernizacja, zwiększanie możliwości technologicznych; wskaźniki: liczba innowacyjnych produktów wprowadzonych na rynek w skali roku, redukcja wypadków i urazów klientów wynikających z użytkowania wyrobu, średni czas pomiędzy kolejnymi wdrożeniami produktów, redukcja roszczeń gwarancyjnych, wskaźnik sukcesu patentowego),

- SDG12 – odpowiedzialna konsumpcja oraz produkcja (działania: zachęty do korzystania z zasobów naturalnych, rozwój zrównoważonych produktów z wbudowanymi funkcjami ponownego użycia i recyklingu; wskaźniki: redukcja kosztów w NPD, procent użytych materiałów pochodzących z recyklingu, redukcja wagi, liczba komórek organizacyjnych odpowiedzialnych za testowanie produktów),
- SDG17 – współdziałanie na rzecz wszystkich celów (działania: zwiększenie uczestnictwa w centrach badawczych, uczelniach wyższych oraz podobnych organizacjach, budowanie potencjału bazującego na unikalnych zasobach; wskaźniki: liczba podpisanych umów partnerskich, dzielenie się zasobami, zorientowanie na produkt, wzrost eksportu, transfer technologii oraz współpraca z praktykami)<sup>18</sup>.

Wśród wniosków kierowniczych i społecznych wynikających z badań literaturowych Palsodkara oraz współautorów zauważono, że zwiększone możliwości przetwarzania danych wynikające z zastosowania technologii I 4.0 umożliwiają lepsze dostosowanie się do potrzeb klientów oraz strategii organizacyjnych, szczególnie w aspekcie wykorzystania IoT, BD oraz ML. Ponadto autorzy zaproponowali także szereg wskaźników związanych z postępem technologicznym, finansami, innowacjami czy środowiskiem (np. redukcja wagi, procent użytych materiałów nadających się do recyklingu)<sup>19</sup>.

Patil i inni opisali z kolei proces NPD w kontekście I 4.0. Oprócz inteligentnych produktów (SP) podjęli oni także próbę zdefiniowania inteligentnych systemów wytwarzania (*Smart Manufacturing Systems* – SMS), charakteryzując ich zmieniające się wymagania i cechy (tabela 14)<sup>20</sup>.

**Tabela 14.** Charakterystyka wymagań SMS w różnych kontekstach

Kontekst	Wymagania SMS	Charakterystyka SMS
1	2	3
<b>Klienta</b>	Wrażliwość, elastyczność oraz wszechstronność systemu	Modułowość, heterogeniczność, skalowalność, zwinnność, możliwość ponownego użycia, możliwość komponowania

<sup>18</sup> Tamże, s. 11–13.

<sup>19</sup> Tamże, s. 31.

<sup>20</sup> A. Patil, M. Kulkarni, P. Rao, *New Product Development (NPD) Process in the Context of Industry 4.0*, Proceedings, IEEE IEEM, Macau, China 2019.

1	2	3
<b>Efektywności operacji i kontroli</b>	Automatyzacja, autonomiczność, świadomość	Samoświadomość, samoorganizacja, tworzenie właściwych informacji we właściwym czasie dla odpowiednich ludzi, szczupłe podejście, autonomia, pełna automatyzacja
<b>Efektywności operacji i utrzymania</b>	Spryt i inteligencja	Adaptacyjność, proaktywność, niezawodność, wytrzymałość, odporność
<b>Komunikacyjny i sieciowy</b>	Interoperacyjność i współdziałanie	„Cyfrowa obecność”, sieciowość, możliwość integracji, zdecentralizowane podejmowanie decyzji, kompleksowe połączenia, rozproszenie – sieć działań jako czynnik umożliwiający istnienie „cyfrowej obecności”, integralności oraz interoperacyjności
<b>Projektowania i planowania</b>	Wykorzystywanie danych o produkcie	Technologia BD, adekwatność informacji rozumiana jako zdolność do gromadzenia, przechowywania i zapewnienia jakości oraz jej dostępności wraz z jasnością informacji przeznaczona dla konkretnych ludzi lub procesów we właściwym czasie
<b>Jakości</b>	Zapewnienie jakości	Dokładność i odporność

**Źródło:** A. Patil, M. Kulkarni, P. Rao, *New Product Development (NPD) Process in the Context of Industry 4.0*, Proceedings 2019, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE/IEEM 2019, Macao, China 2019, s. 1232.

Autorzy wskazali także – ich zdaniem – nowe wymagania związane z procesem NPD, do których zaliczyli projektowanie wspomagające/uwzględniające:

- zmienne potrzeby (*Design for Changing requirements* – DfCR),
- usługi oparte na danych (*Design for Data Driven Services* – DfDDS),
- współtworzenie (*Design for Co-Creation* – DfCC) oraz współprojektowanie ze stroną trzecią, w szczególności z partnerami i użytkownikami sieciowymi oraz projektantami oprogramowania (*Design for Co-design of Value with Third Party* – DfCD),

- autonomię i decentralizację decyzji (*Design for Autonomy and Decentralized Decision Making* – DfA&DDM),
- komponenty związane z informacją oraz oprogramowaniem (*Design for Information and Software Related Components* – DfI&S),
- przepływ materiałów oraz operacji (*Design for Material/Operation Flow* – DfM/OF),
- zarządzanie danymi produktu (*Design for Product Data Management* – DfPDM),
- operacje oparte na danych (*Design for Data Driven Operation* – DfDDO),
- bezpieczeństwo (*Design for Safety & Security* – DfSS),
- kontrolę w czasie rzeczywistym produkowanych części (*Design for Inline Inspection of Manufactured Parts* – DfII),
- pionową, poziomą oraz cyrkularną integrację (*Design for Vertical, Horizontal and Circular Integration* – DfIntg),
- wykorzystanie chmury (*Design for Cloud-enabled* – DfCenb) do prognoz, utrzymania ruchu, interoperacyjnych standardów dla interfejsów danych czy też komunikacji<sup>21</sup>.

Ci sami autorzy zaproponowali kolejne etapy procesu NPD wspierającego I 4.0 oraz SMS i zaliczyli do nich:

- planowanie (bazujące na identyfikacji potrzeb, ale także i usług im towarzyszących – tutaj tworzona jest idea produktu i wykorzystywane projektowanie wspomagające usługi – DfS<sub>vc</sub>),
- rozwój koncepcji (zawierający DfA&DDM, DfCC, DfCD),
- projektowanie poziomów systemu (DfI&S, DfCD, DfM&OF),
- projektowanie szczegółowe (DfSS, DfIntg, DfII, DfPDM),
- testowanie oraz doskonalenie,
- wdrażanie projektu opartego na wykorzystaniu danych w czasie rzeczywistym z mechanizmami informacji zwrotnej o wartościach użytkowych oraz doświadczeniach użytkowników uzyskanych z wykorzystania danych o produkcie<sup>22</sup>.

Informacje w formie sprzężenia zwrotnego dotyczące spostrzeżeń czy też możliwych szans związanych z doskonaleniem produktu mają możliwość powrotu o jeden lub kilka etapów wstecz, dzięki czemu trafiają do właściwego miejsca, adekwatnego do koniecznej modyfikacji. Całość modelu wyraźnie nastawiona jest na uwzględnianie w samym produkcie kwestii związanych z technologiami I 4.0. Kluczowa dla całego modelu okazuje się możliwość śledzenia danych o produkcie w rzeczywistym czasie jego użytkowania.

Podobnie jak Patil i współautorzy, tak Rosario i Dias wskazują na konieczność uwzględnienia w projektowaniu produktu aspektów związanych z technologiami I 4.0,

<sup>21</sup> Tamże, s. 1232.

<sup>22</sup> Tamże, s. 1233.

zwłaszcza czujników<sup>23</sup>. Same czujniki mają różnorodne zastosowanie, które jest zależne od gałęzi przemysłu. Ich zasada polega na łączeniu wielu urządzeń i systemów, co pozwala urządzeniom i systemom komunikować się oraz śledzić ich działania. Wynika to z budowy czujników, które otrzymując bardzo różnorodny sygnał wejściowy, są w stanie przetworzyć go na kod cyfrowy. Wyposażone w czujniki inteligentne systemy wytwarzania (SMS) tworzą inteligentne produkty (SP), posiadające wysoki potencjał do zaspokajania potrzeb klienta poprzez wymianę informacji w czasie rzeczywistym z wytwórcą produktu oraz swoją adaptacyjność. Zdaniem autorów, aby można było stworzyć tego typu produkty, konieczne jest zwrócenie uwagi na kwestie projektowania ze szczególnym uwzględnieniem projektowania wspomagającego:

- pozycję klienta i użytkownika (*Design for Empowered Users/Customers* – DfEU) – partycypacja użytkownika wyrobu we wszystkich fazach projektowania, włączając w to możliwość wytwarzania produktu przez samego klienta i stosowania zachęt, by taki proces produkcyjny klienci posiadali we własnym zakresie (CC, AM, CAD, skanery 3D – 3D Object Scanners – 3D-S),
- cyberbezpieczeństwo (*Design for Cyber-Security* – DFCS) – w systemach CPS integrowane pionowo i poziomo dane, ich wymiana, analiza odgrywają główną rolę, co wzmacnia kwestie ich bezpieczeństwa (np. hakerzy, wirusy, robaki i konie trojańskie),
- analitykę danych (*Design for Data Analytics* – DfDA) – analiza danych wspierana AI, ML oraz eksploracją danych (*Data Mining* – DM),
- możliwość zmiany (*Design for Changeability* – DfCh) – produkty posiadające wbudowaną podatność na potencjalne niewielkie zmiany w użytkowaniu oraz przyszłe zmiany związane z modernizacją wyrobu<sup>24</sup>.

Jednocześnie autorzy zauważają trzy podstawowe ograniczenia związane z barierami infrastrukturalnymi, kompetencjami technologicznymi oraz kwestiami prawnymi.

Mówiąc o PD, nie sposób nie wspomnieć o kwestiach wiedzy, umiejętności i kompetencji osób zajmujących się tym procesem. Sallati i współautorzy, badając platformę testową wspierającą proces zarządzania PD, podzielili tę kwestię pomiędzy trzy kategorie: technologiczne, społeczne i bezpośrednio związane z osobą zajmującą się PD, czyli osobiste<sup>25</sup>. Zakres wykazanych kompetencji przedstawia tabela 15.

23 A. Rosario, J. Dias, *How Industry 4.0 and Sensors Can Leverage Product Design: Opportunities and Challenges*, „Sensors” 2023, vol. 23(3).

24 Tamże, s. 14–15.

25 C. Sallati, J. de Andrade Betazzi, K. Schutzer, *Professional Skills in The Product Development Process: The Contribution of Learning Environments to Professional Skills in The Industry 4.0 Scenario*, Proceedings, 29<sup>th</sup> CIRP Design Conference 2019, Procedia CIRP 84, Povo de Varzim, Portugal 2019.

**Tabela 15.** Kompetencje I 4.0 wynikające z platformy testowej

Wymagane kompetencje i umiejętności w konkretnych kategoriach		
Techniczne	Społeczne	Personalne
Integracja z systemami IT przedsiębiorstwa	Umiejętność współpracy i szukania kompromisu	Możliwości i chęci zdobywania nowej wiedzy
Wiedza o standardach zabezpieczeń i komunikacji	Umiejętność przekazywania i dzielenia się wiedzą	Umiejętność pracy pod presją
Komunikacja wirtualna i umiejętności medialne	Współpraca w synchronizacji procesów, dostarczania danych oraz analizy usterek	Umiejętności analityczne i logiczne
Znajomość serwerów	Zdolności badawcze	Zdolności przywódcze
Optymalizacja satysfakcji klienta	Wielokulturowość i umiejętności językowe	Motywacja do pozyskiwania wiedzy
Bazowanie na najnowocześniejszym stanie nauki	Zdolność podejmowania decyzji oraz rozwiązywania problemów	Zdolności komunikacyjne i pomagające tworzyć sieć powiązań
Znajomość obecnych procesów wytwórczych	Elastyczność co do miejsca i czasu	Niezawodność i odpowiedzialność
Rozumienie procesów		

**Źródło:** C. Sallati, J. de Andrade Betazzi, K. Schutzer, *Professional Skills in The Product Development Process: The Contribution of Learning Environments to Professional Skills in The Industry 4.0 Scenario*, Proceedings, 29<sup>th</sup> CIRP Design Conference 2019, Procedia CIRP 84, Povo de Varzim, Portugal 2019, s. 207.

Zaprezentowany zestaw kompetencji bardzo ciekawie kontrastuje z zachowaniami kolejnych społecznych pokoleń (X, Y, Z), dla których część tych umiejętności i zdolności może być na skutek uwarunkowań rozwoju cywilizacyjnego i społecznego nieosiągalna<sup>26</sup>.

Dość ciekawą kwestią technologii I 4.0 w PD zajęli się Wagner i współautorzy<sup>27</sup>. Skoncentrowali się oni na technologii bliźniaków cyfrowych – cyfrowych kopii ( $DT_w$ ) w kontekście PD. Samo pojęcie  $DT_w$  składa się z trzech podstawowych warstw:

- fizycznej (produkt, maszyna, proces itp.),
- wirtualnej (produkt, maszyna, proces itp.),
- łączącej warstwę fizyczną z wirtualną.

Odnosząc to do PLC, zauważymy, że w każdym jego etapie wszystkie trzy warstwy są wykorzystywane ze szczególnym uwzględnieniem warstwy wirtualnej oraz łączącej, ponieważ stwarzają one nowe możliwości, jeśli chodzi o sfery:

26 Ciekawe wyniki badań na ten temat przeprowadziła J.M. Twenge, *iGen*, Sopot 2019.

27 R. Wagner, B. Schleich, B. Haefner, A. Kuhnle, S. Wartzak, G. Lanza, *Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products*, Proceedings, 29<sup>th</sup> CIRP Design Conference 2019, Procedia CIRP 84, Povo de Varzim, Portugal 2019, s. 88–93.



- produktu – cyfrowe kopie produktu zintegrowane z wiedzą na jego temat,
- wytwarzania – cyfrowe kopie procesów wytwarzania zintegrowane z wiedzą o produkcie,
- użytkowania – cyfrowe kopie użytkowania produktu zintegrowane z wiedzą o danym wytworze<sup>28</sup>.

W zasadzie ta formuła cyfryzacji, w której świat fizyczny jest przenoszony do świata wirtualnego wraz cyfrowym i fizycznym ich połączeniem, umożliwia znacznie wcześniejszą predykcję wszystkich przyszłych stanów produktu, procesu, usługi itp. Dodatkowo zbiera, o czym już mówiono we wcześniejszych artykułach, dane dotyczące użytkowania wyrobu w czasie rzeczywistym, co pozwala z jednej strony nim zarządzać w kwestii jego doskonalenia, z drugiej strony umożliwia pozyskiwanie informacji związanych z końcem życia wyrobów, które mogą wiązać się z pozyskiwaniem surowców, materiałów i komponentów.

Projektowaniem inteligentnych produktów (SP) w kontekście masowej kastomizacji zajęli się Zawadzki i Żywicki<sup>29</sup>. Bazując na inżynierii wspomaganej wiedzą (*Knowledge Based Engineering* – KBE), autorzy zwrócili uwagę, że projektowanie uwzględniające inteligentne technologie staje się niezbędnym elementem SE, a masowa kastomizacja jej atrybutem (rysunek 33). Masowa kastomizacja już w samej swojej nazwie stanowi z punktu widzenia inżynierii sprzeczność. Przyjmując, że produkty wysoce spersonalizowane odpowiadają typowi produkcji jednostkowej, to mówienie o personalizacji w przypadku typu produkcji masowej może tworzyć odmianę produkcji, która z założenia nie będzie działała (kwestie kosztowe, czasowe, logistyczne itp.)<sup>30</sup>.

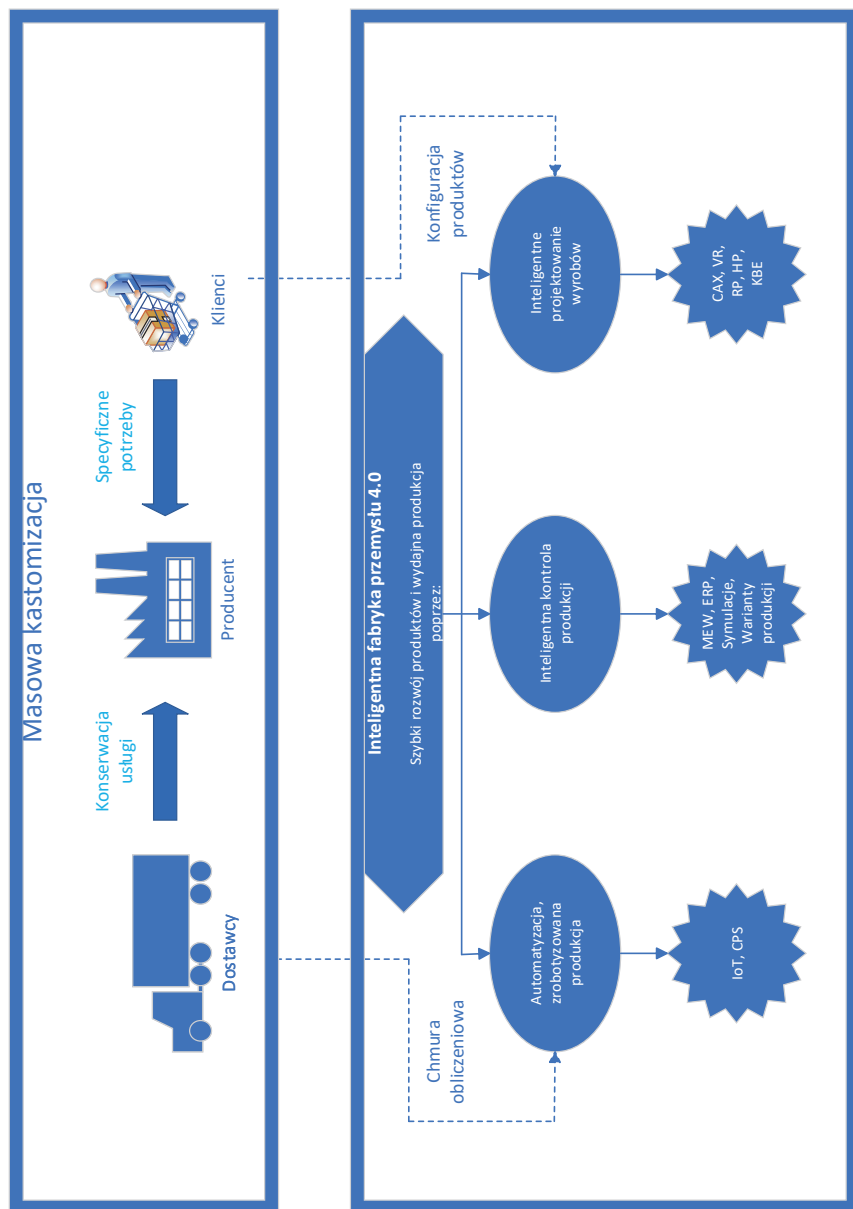
Jak pokazano na rysunku 33, personalizacja produktu przez klienta generuje całą sieć powiązań pomiędzy projektowaniem inteligentnych produktów (SPD), inteligentną kontrolą produkcji a zautomatyzowaną i zrobotyzowaną produkcją.

Do projektowania inteligentnych produktów wykorzystuje się: komputerowe wspomaganie (CAX), VR, inżynierię opartą na wiedzy (KBE), szybkie prototypowanie (*Rapid Prototyping* – RP) oraz hybrydowe prototypowanie (*Hybrid Prototyping* – HP) – łączenie projektowania wirtualnego z fizycznym. Inteligentna produkcja realizowana jest poprzez systemy klasy ERP, systemy realizacji produkcji (*Manufacturing Execution System* – MES), symulacje oraz wariantowość produkcji. Z kolei automatyzacja i robotyzacja bazują na systemach cyberfizycznych (CPS) oraz Internecie Rzeczy IoT. Całość spaja chmura obliczeniowa CC, a działanie systemu napędza klient, który określa swoje potrzeby oraz konfiguruje sam produkt.

28 Tamże, s. 90–91.

29 P. Zawadzki, K. Żywicki, *Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in The Industry 4.0 Concept*, „Management and Production Engineering Review” 2016, vol. 7(3), s. 105–112.

30 Odnośnie do typów, form i odmian organizacji produkcji więcej można znaleźć w pozycji I. Durlik, *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych w gospodarce rynkowej*, Katowice 1993, s. 111–117.

**Rysunek 33.** Realizacja strategii masowej kustomizacji w inteligentnej fabryce

**Źródło:** P. Zawadzki, K. Żywicki, *Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in The Industry 4.0 Concept*, „Management and Production Engineering Review” 2016, vol. 7(3), s. 106.

Jak zaprezentowano w tym rozdziale, obszar zagadnień związanych z PD w kontekście I 4.0 wydaje się ograniczony wyłącznie ludzką wyobraźnią. Mnogość zastosowań technologii I 4.0 oraz miejsc ich wykorzystania w procesie PD jest dość pokaźna. Należy jednak zwrócić uwagę, że zaprezentowany przegląd literatury tworzy dwie odmienne ścieżki dotyczące posługiwania się I 4.0 w PD, a więc zmian adaptacyjnych oraz gruntownych.

Pierwsza ze ścieżek pokazuje włączanie technologii I 4.0 do obecnie funkcjonujących paradygmatów projektowania, wytwarzania, logistyki itp., pokazując możliwości podnoszenia wydajności i efektywności. Druga ścieżka proponuje radykalne zmiany dotychczasowych przyzwyczajeń konsumentów, ale także odejście od klasycznych metod projektowania i wytwarzania, a jeszcze szerzej – do zarządzania organizacją. Pojawiające się kwestie zrównoważenia aktywności przedsiębiorstw i konsumentów, uwzględnienia kwestii środowiskowych czy też przenoszenia świata fizycznego do wirtualnego obrazują, jakie możliwości stoją teraz przed światem nauki i przemysłu.

Kolejne rozdziały poświęcone zostaną trzem – zdaniem autora – najciekawszym technologiom I 4.0 oraz ich wpływom na proces PD, tzn. wirtualnej rzeczywistości, Internetowi Rzeczy oraz sztucznej inteligencji.

## 4.2. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście wirtualnej rzeczywistości

Rozszerzona rzeczywistość (AR) wraz z wirtualną rzeczywistością (VR) wykorzystywane są już w swych prymitywnych formach od lat czterdziestych XX wieku w wielu obszarach różnorodnej aktywności ludzi, np. wytwarzaniu, wojskowości, medycynie, architekturze czy też przemyśle lotniczym<sup>31</sup>.

Pierwsza z prezentowanych technologii – AR – pozwala poszerzyć realne środowisko poprzez dodatki cyfrowe, umożliwiające komunikację człowiek–maszyna (M2M), wykorzystując do tego narzędzia wyposażone w sensoryczne interfejsy (dźwięku, obrazu oraz czucia)<sup>32</sup>. AR posiada potencjał rozwiązywania problemów projektantów na wczesnym etapie procesu projektowania. Umożliwia ona otrzymanie znacznie większej ilości informacji o projektowanym wyrobie bez konieczności tworzenia w pełni fizycznego modelu, a jakość informacji, w tym informacji zwrotnych

31 R. Hu, H. Chen, *Application of Virtual Reality Technology in Industrial Creative Product Design*, *International Conference on Communications, Electronic Technology and Computer Engineering*, CETCE 2021, „Journal of Physics: Conference Series 1992” 2021, vol. 022016, s. 1.

32 K. Mainzer, *From Augmented Reality to the Internet of Things: Paradigm Shift in Digital Innovation Dynamics*, [w:] J. Ariso, *Augmented Reality: Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation*, Berlin 2017, s. 25.

od potencjalnych użytkowników, można porównać z informacjami zwrotnymi opartymi na tradycyjnym modelu<sup>33</sup>. Należy przy tym zauważyć, że AR poszerza realne środowisko, a więc może bądź to zwizualizować cyfrowy model w realnej rzeczywistości, bądź to uzupełniać prototyp o cyfrowe detale. Stanowi ona zatem nieco uboższą wersję VR, więc z punktu widzenia prezentowanego opracowania zagadnienie wykorzystania AR w PD nie będzie rozwijane.

Jeśli chodzi o VR, to przyjmuje się, że pierwszą jej definicję podał Sutherland w 1960 roku, opisując VR jako okno, przez które użytkownik może za pomocą swych zmysłów oglądać wirtualny świat w taki sposób, jak gdyby był on realny (ogląda, czuje, słyszy, ale i jest jego uczestnikiem mogącym na niego oddziaływać)<sup>34</sup>. Z kolei Xiao i Yang definiują VR jako multidyscyplinarną technologię bazującą na technologii komputerowej (IT) wykorzystującej grafikę, multimedia, symulacje oraz interakcje pomiędzy człowiekiem a komputerem wspomagane czujnikami, które tworzą całe VE. W takim układzie użytkownik VR może realizować naturalne zachowania w wirtualnym świecie<sup>35</sup>.

Berg i Vance<sup>36</sup> opisują VR jako immersyjną technologię komputerową (*Immersive Computing Technology* – ImmCT)<sup>37</sup>, pozwalającą użytkownikowi w szczególny sposób wchodzić w interakcje z ciągle rozrastającą się przestrzenią wirtualną. Dotyczy to zwłaszcza trzech podstawowych zmysłów: widzenia, słyszenia oraz dotyku, które w ramach technologii VR są coraz bardziej rozwijane (zapewnienie odczuwania zapachu i smaku w dalszym ciągu pozostaje w początkowej fazie rozwoju). Oznacza to, że fundamentem VR są ludzkie odczucia, które to algorytmy komputerowe symulują w wirtualnym świecie w konkretnych scenariuszach, a wyświetlacze renderują<sup>38</sup> symulacje ludzkim zmysłom.

Fazy rozwoju wirtualnej rzeczywistości można podzielić na cztery podstawowe etapy, które wyróżniały następujące technologie<sup>39</sup>:

- 1) połączone z komputerem zestawy sensorów umiejscowione na głowie (lata 1960–1980, główne zastosowanie do symulacji inżynierskich z ograniczeniami w zakresie swobody ruchów – połączenia przewodowe; przykładowy system to *Damocles' Sword*),

33 T. Purdy, Y. Choi, *Enhancing Augmented Reality for Use in Product Design*, Proceedings, Conference on Human Factors in Computing Systems, Toronto, Canada 2014, s. 1304.

34 I. Sutherland, *The Ultimate Display. Multimedia: From Wagner to Virtual Reality*, New York 1965.

35 P. Xiao, G. Li, M. Yang, *The Application of Virtual Reality to Product Development of Automobile Parts and Spares*, International Conference on Intelligent Processing Systems – IEEE 1997, Beijing, China 1997, s. 1752.

36 L. Berg, J. Vance, *Industry Use of Virtual Reality in Product Design and Manufacturing: A Survey*, „Virtual Reality” 2017, vol. 21(1), s. 1–2.

37 Immersyjny – wciągający, stwarzający poczucie użytkownika bycia w świecie wirtualnym.

38 Transformacja kodu cyfrowego na oczekiwany efekt wizualny, wokalny itp.

39 A. Berni, Y. Borgianni, *Applications of Virtual Reality in Engineering and Product Design: Why, What, How, When and Where*, „Electronics” 2020, vol. 9(1064), s. 2.

- 2) pokoje sensoryczne z immersyjną rzeczywistością (lata dziewięćdziesiąte XX wieku, główne zastosowanie to poszerzanie funkcjonalności gier komputerowych; samo rozwiązanie kosztowne, nieporęczne, z niekomfortowym sprzętem komputerowym; przykładowe systemy to *Powerwall* – PWLL [jeden duży ekran projektora] czy też CAVE [*Cave Automatic Virtual Reality* – jaskinia wirtualnego środowiska, wielokrotnie połączone ekrany projektorów]),
- 3) bazujące na komputerach PC sześciennne pokoje z widokiem panoramicznym (lata dwutysięczne, głównie służące aktywnościom eksperymentalnym, wspomagane aplikacjami wykorzystującymi Internet, z pewnymi problemami w zakresie użyteczności, które jednak stopniowo były rozwiązywane poprzez rozwój i eksplorację technologii; przykładowe systemy – SAS CUBE [SAS3]),
- 4) kontynuacja rozwoju etapu trzeciego ze szczególnym uwzględnieniem poprawy ergonomii i znaczącą obniżką kosztów instalacji typu CUBE (przenikanie i zastosowanie na wielu polach i dyscyplinach ludzkiej aktywności z dość czasochłonnym przygotowaniem całych projektów ze względu na kwestie dostosowania grafiki; przykładowe systemy HMD [*Head Mounted Displays* – montowane na głowie wyświetlacze], np. gogle serii HTC Vive oraz serii Oculus Rift, Oculus Quest itd.).

Wśród innych technologii VR znajdują się jeszcze systemy pulpitowe VR wyposażone w stereoskopowe okulary pozwalające oglądać trójwymiarowe obiekty, urządzenia VR tworzące makiety rzeczywistości mieszanej oraz inne rozwiązania, jak choćby stosowane w kartach graficznych technologie *Open Ray-Trace* wspomagające głównie graczy w hiperrealistyczne efekty światła i cieni.

Każde z prezentowanych rozwiązań w większości posiada swoje rozwinięcia komercyjne. Należy bowiem pamiętać, że przy tak dynamicznie zmieniającym się otoczeniu przemysł oczekuje raczej rozwiązań prostych, tanich i z możliwością szerokiego zastosowania, ponieważ – jak pokazuje czwarty etap – czasochłonność przygotowania projektów stanowi poważną barierę w zakresie implementacji technologii VR w przemyśle.

Każdy system VR składa się z trzech podstawowych komponentów:

- pakietów oprogramowania (aplikacji),
- urządzeń wejściowych,
- urządzeń wyjściowych.

Aplikacje zapewniają komunikację pomiędzy urządzeniami będącymi elementami systemu VR. Połączenie pomiędzy użytkownikiem a VR odbywa się poprzez urządzenia wejściowe, a efekt aktywności użytkownika przedstawiany jest na urządzeniach wyjściowych świata wirtualnego<sup>40</sup>.

40 C. Anthes, R. Garcia-Hernandez, M. Wiedemann, D. Kranzlmuller, *State of The Art of Virtual Reality Technology, Conference Proceedings, IEEE Aerospace Conference: Big Sky, Montana, USA 2016*, s. 3–6.

Balzerkiewitz i Stechert zwracają uwagę na bardzo ważną cechę VR, jaką jest tworzenie przez VR środowiska immersyjnego. Aby jednak było to spełnione, potrzeba realizacji pięciu podstawowych założeń:

- 1) stworzenia wirtualnego świata (generowanej komputerowo przestrzeni zawierającej wszystkie obiekty),
- 2) nadania użytkownikom prawa wchodzenia do wirtualnego świata i dokonywania w nim zmian,
- 3) stworzenia poczucia użytkownika, że znajduje się on wewnątrz świata wirtualnego (immersja – izolacja od świata realnego i możliwość wchodzenia w interakcje w świecie wirtualnym),
- 4) możliwości wchodzenia użytkownika w interakcje w świecie wirtualnym (sposób, w jaki użytkownik może manipulować elementami świata wirtualnego: składać, rozkładać, przesuwać, przemieszczać itp.),
- 5) sprzężenia zwrotnego pomiędzy światem wirtualnym a światem realnym (wizualne, dźwiękowe, dotykowe, zapachowe itp.)<sup>41</sup>.

Stopień immersji, czyli wchodzenia, zanurzania się czy też pochłaniania przez VR, może być więc różny. Zależy od wykorzystywanych technologii oraz celu projektu związanego z VR.

Cipresso wraz ze współautorami dokonali podziału na trzy stopnie immersji użytkownika w VR, tworząc w ten sposób trzy odrębne systemy VR:

- nieimmersyjne (systemy wykorzystujące pulpit do projektowania wirtualnej rzeczywistości – najprostsze i zarazem najtańsze),
- połowicznie immersyjne (zapewniające trójwymiarowość i stereofoniczność, ale w dalszym ciągu wykorzystujące monitor),
- immersyjne (zapewniające pełną symulację dzięki obsłudze różnorodnych sensorów zamontowanych na ciele użytkownika)<sup>42</sup>.

Obecnie coraz więcej uwagi poświęca się przemysłowemu wykorzystywaniu VR, doskonaląc technologie wyświetlania i interakcji, które pozwalają użytkownikom przeglądać, nawigować oraz wchodzić w interakcje w środowisku wirtualnym (*Virtual Environment* – VE). Kwestie implementacji VR w przemyśle, ocena wpływu VR na codzienne życie, miejsce pracy, interakcje człowiek–maszyna czy też ocena skutków ubocznych wykorzystywania VR w praktyce przemysłowej coraz częściej stają się obszarem badań naukowych<sup>43</sup>. W literaturze przedmiotu pojawiają się także

41 H. Balzerkiewitz, C. Stechert, *Product Development Methods in Virtual Reality*, „Proceedings of the Design Society” 2021, vol. 1, s. 2451–2452.

42 P. Cipresso, I. Giglioli, M. Raya, G. Riva, *The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature*, „Frontiers in Psychology” 2018, vol. 9(2086), s. 2–3.

43 D. Talaba, C. Antonya, A. Stavar, V. Georgescu, *Virtual Reality in Product Design and Robotics*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom, 2011, Conference Proceedings, Budapest, Hungary 2011, s. 1.

pojęcia wirtualnego wytwarzania (*Virtual Manufacturing* – VM) oraz wirtualnego prototypowania (*Virtual Prototyping* – VP).

VM rozumiane jest jako zintegrowany system bazujący na technologii ICT oraz VR, pozwalający symulować przyszłe procesy produkcyjne w czasie rzeczywistym już na etapie projektowania produktu. Efektem VM jest proces produkcyjny, wolny od wielu wad związanych z szeregiem różnorodnych uwarunkowań wytwarzania, takich jak: jakość, czas, koszt, efektywność, wydajność czy też produktywność<sup>44</sup>.

VR stanowi kluczową technologię dla VP poprzez umożliwienie wykorzystania przez użytkownika łatwego interfejsu otwierającego wirtualną przestrzeń projektową ułatwiającą interaktywną eksplorację funkcjonalności projektowanego produktu. Wykorzystywanie VR w VP daje możliwość manipulowania projektowanym produktem i wchodzenia z nim w interakcje. Pozwala także na wykonywanie wirtualnych zmian, np. materiałów, powierzchni, kolorów, co w rzeczywistości produkcyjnej nie byłoby możliwe do wdrożenia. Możliwość doświadczania przez inżynierów za pomocą sensorów wirtualnego prototypu udostępnia już w fazie projektowania produktów szereg informacji dotychczas nieosiągalnych na tym etapie<sup>45</sup>.

Wykorzystanie VR w projektowaniu i rozwoju produktu (PD), nazywane także jako projektowanie wirtualne oparte na technologii wirtualnej rzeczywistości lub też po prostu wirtualne projektowanie (*Virtual Design* – VD), dotyczy szeregu zastosowań. Wirtualne projektowanie to cały proces, począwszy od przygotowania koncepcji poprzez przygotowanie VE – stworzenie komputerowej, wirtualnej struktury pozwalającej realizować ten proces – na symulacji, wizualizacji samego produktu i procesu produkcyjnego, a także funkcjonalności samego produktu oraz parametrów, mierników i wskaźników każdego etapu cyklu życia produktu kończąc<sup>46</sup>.

Cytowani już Berni i Borgianni<sup>47</sup>, aby pokazać możliwości wykorzystania VR w PD, wyznaczyli sześć podstawowych zakresów i funkcji projektowych, które skategoryzowali w następujące grupy:

- wczesną fazą projektową (koncepcja), współprojektowanie, modelowanie 3D, wirtualne prototypowanie (VP) i montaż (*Virtual Assembly*),
- symulacje mechaniczne – metoda elementów skończonych (*Finite Element Method* – FEM),
- projektowanie właściwe, ocena produktu; kwestie edukacyjne.

W ramach każdej z grup zaproponowali konkretne działania projektowe, co zostało pokazane w tabeli 16.

44 P. Xiao, G. Li, M. Yang, *The Application of Virtual Reality to Product...*, s. 1752.

45 K. Backhaus, J. Jasper, K. Westhoff, J. Gausemeier, M. Grafe, J. Stocklein, *Virtual Reality Based Conjoint Analysis for Early Customer Integration in Industrial Product Development*, „Procedia CIRP” 2014, vol. 25, s. 64.

46 R. Hu, H. Chen, *Application of Virtual Reality Technology...*, s. 2.

47 A. Berni, Y. Borgianni, *Applications of Virtual Reality in Engineering...*, s. 6.



Tabela 16. Wybrane kategorie projektowe wspierane przez VR

Lp.	Kategorie	Działania projektowe wspierane przez VR
1.	<b>Koncepcja</b>	Kreatywne projektowanie wykorzystujące wirtualne szkicowanie ( <i>Virtual Sketching</i> – VS)
2.	<b>Współprojektowanie</b>	Symulacja i ocena projektu, przeprojektowanie z wykorzystaniem modeli i danych
3.	<b>Modelowanie 3D</b>	Wirtualne modelowanie ( <i>Virtual Modeling</i> – VM), np. wirtualne modelowanie w glinie ( <i>Virtual Clay Modeling</i> – VCM), manipulacja geometryczna oraz wizualizacja, immersja koncepcji i detali
4.	<b>Projektowanie właściwe</b>	Projektowanie właściwe mające na celu udzielenie odpowiedzi, czy połączone elementy będą działać – symulacje i kontrola procesów, FEM, symulacja 3D pracy operatora połączona z oceną ergonomiczną
5.	<b>Ocena</b>	Ocena wirtualnego prototypu przez użytkowników – zebranie informacji zwrotnych na temat doświadczeń, preferencji oraz reakcji związanych z produktem
6.	<b>Edukacja</b>	Wsparcie procesu edukacji projektantów z doświadczeń wynikających z wykorzystania VR w PD

**Źródło:** A. Berni, Y. Borgianni, *Applications of Virtual Reality in Engineering and Product Design: Why, What, How, When and Where*, „Electronics” 2020, vol. 9(1064), s. 6.

Zastosowanie VR w PD może być przeznaczone również dla klientów. Górski wraz ze współautorami zaprezentowali klientowi multimodalny i kompleksowy system wizualizacji wybranych przez niego konfiguracji produktów przed ich zakupem<sup>48</sup>. System pozwala dowolnie konfigurować konkretne cechy produktu (ponad 100 opcji), wykorzystując do tego trzy niezależne, lecz zintegrowane systemy. W pierwszym etapie – prekonfiguracji – klient otrzymuje na multimedialnym stole dotykowym wizualizację spersonalizowanego produktu. Na kolejnym etapie widzi już skonfigurowany produkt na dużym wyświetlaczu z możliwością pełnej interakcji oraz modyfikacji wytworu. Ostatni etap to wykorzystanie technologii HMD, pozwalającej w pełni immersyjnie oddziaływać na produkt: otwierać, zamykać, włączać, wyłączać itp. Cały system bazuje na standardowych urządzeniach peryferyjnych takich jak mysz, klawiatura czy joystick, a gesty i ruchy rozpoznawane są przez optyczne systemy śledzenia (*Optical Tracking Systems* – OTS) albo kontaktowe urządzenia rozpoznające gesty. W ten sposób klient jeszcze przed zakupem produktu może już wiedzieć, jak w przybliżeniu będzie wyglądał jego nabytek. Takie podejście może doskonale współgrać z procesem PD. Zaprojektowany prototyp produktu mógłby być cyfrowo udostępniany testującym klientom, a system zbierania opinii pozwalałby na doskonalenie prototypu uwzględniające ich życzenia.

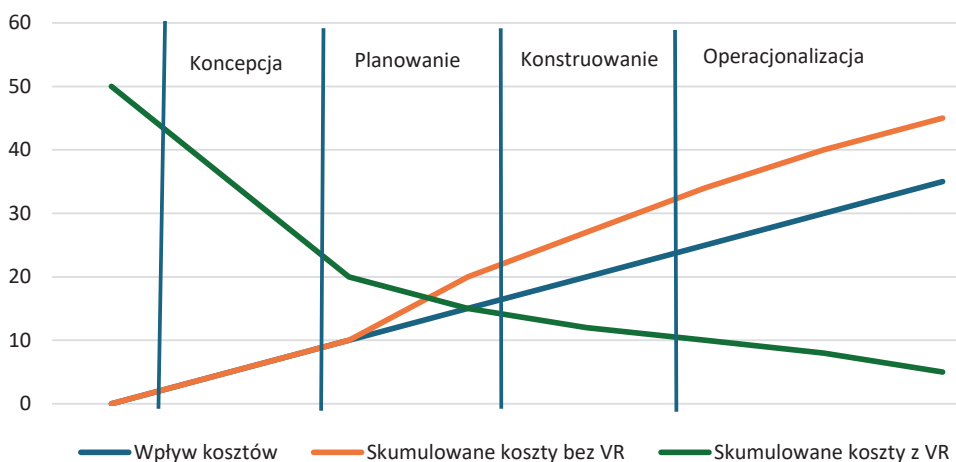
<sup>48</sup> F. Górski, P. Buń, R. Wichniarek, P. Zawadzki, A. Hamrol, *Design and Implementation of a Complex Virtual Reality System for Product Design with Active Participation of End User*, International Conference on Human Factors, Software, and Systems Engineering, AHFE 2016, „Advances in Intelligent Systems and Computing” 2016, vol. 492, s. 34–35.

Jak zauważają Xu i Chen, PD<sup>49</sup> wykorzystujące VR zmienia dotychczasowe projektowanie przynajmniej w aspekcie trzech elementów:

- intuicyjności i autentyczności projektu,
- skracania czasu projektowania oraz doskonalenia efektywności tego procesu,
- redukcji kosztów i poprawy konkurencyjności projektowanych produktów.

Klasyczne komputerowe systemy wspomagania projektowania (CAD) przyspieszyły pracę projektantów, zmieniając deski kreślarskie, ołówki i gumki na klawiatury, myszy i monitory. Możliwości szybszej edycji czy też wykorzystywania elementów już zaprojektowanych i dostępnych w formie plików bądź obiektów w sposób oczywisty przyspieszyły pracę zespołów PD. Systemy klasy CAD tworzyły jednak pewne ograniczenia, których VR w pewnym sensie się pozbywa. Projektant może „namacalnie” obejrzeć swój produkt, eksperymentować z nim, testując go w specjalnie stworzonej do tego celu rzeczywistości. Brak konieczności fizycznej budowy prototypu poprzez VP niweluje np. konieczność przygotowania technologicznego do jego wytworzenia, co redukuje koszty związane z przygotowaniem kolejnych prototypów.

Kwestia kosztów została poruszona także przez Blazerkietza i Stecherta<sup>50</sup>. Zdaniem autorów wykorzystanie VR na wczesnym etapie PD pozwala łatwo korygować błędy, co jest kosztowne na kolejnych etapach (rysunek 34).



**Rysunek 34.** Skumulowane koszty cyklu życia produktu z wykorzystaniem VR

**Źródło:** H. Balzerkiewitz, C. Stechert, *Product Development Methods in Virtual Reality*, Proceedings of the Design Society, Pretoria, RPA 2021, vol. 1, s. 278.

<sup>49</sup> R. Hu, H. Chen, *Application of Virtual Reality Technology...*, s. 2–3.

<sup>50</sup> H. Baltzerkiewitz, C. Stechert, *Use of Virtual Reality in Product Development by Distributed Teams*, *Procedia CRIP*, 30<sup>th</sup> CRIP Design 2020, vol. 91, s. 578.

Jak widać na podstawie rysunku 34, najbardziej kosztochłonne są pierwsze fazy projektowania, czyli faza koncepcyjna, planowania oraz konstruowania. VR zdecydowanie minimalizuje koszty właśnie w fazie planowania oraz konstruowania, czyli tam, gdzie pojawia się konieczność przeprowadzania fizycznych prac nad projektowanym produktem. Faza koncepcyjna oraz operacyjna nie dają możliwości minimalizacji kosztów w takim zakresie jak wspomniane fazy planowania i konstruowania.

Kontynuując zagadnienie wykorzystania VR w obszarze potencjalnych klientów, Anddreoletti wraz ze współautorami opisali projektowanie produktu oparte na emocjach klientów z wykorzystaniem VR<sup>51</sup>. Autorzy zauważyli, że problem przewidywania emocji przez przyszłych użytkowników produktu dotychczas był bardzo trudnym zagadnieniem dla projektantów. Wynikało to z faktu braku rozwiązań metodycznych i technologicznych, które mogłyby wspierać zespoły PD w tym zakresie. Badacze zauważają, że VR może stać się bardzo ważnym narzędziem w identyfikacji emocji, które towarzyszą relacji klient–produkt. Zaproponowali oni model użytkownika i środowiska VR stanowiący swoistą pętlę rozpoznawania i wywoływania emocji, w którym mamy do czynienia z dwoma modułami:

- rozpoznawania emocji – rozpoznawanie emocji rozumiane jest jako wynik analizy danych przeprowadzanej na podstawie ukrytych informacji zwrotnych od użytkownika VR,
- wywoływania emocji – wywoływanie emocji następuje poprzez dynamiczną adaptację VR z aktualnie wykrytą emocją oraz emocją docelową<sup>52</sup>.

W ten sposób wykorzystanie VR pozwala tworzyć wirtualne, ale bardzo realistyczne środowiska, które mogą być modyfikowane przez projektantów w celu wywoływania konkretnych emocji. Przekłada się to na możliwość identyfikacji odczuć potencjalnych klientów w projektowanych produktach, usługach, ale także w innych obszarach, np. społecznych.

Na bardzo ciekawy aspekt VR zwrócili uwagę Dixen i współautorzy<sup>53</sup>. Poruszyli oni bowiem temat wyglądu samego awatara (cyfrowa, graficzna, wirtualna forma użytkownika, którą widzą inni użytkownicy i on sam – wirtualny wizerunek) pracownika projektującego w szerszej grupie, a w zasadzie dopracowywania wirtualnych ruchów awatarów (ich kalibracji) przy użyciu specjalistycznego oprogramowania w celu osiągnięcia płynności i naturalności ruchów. Praca z VR w wielu miejscach

51 D. Anddreoletti, L. Luceri, A. Petenier, T. Leidi, S. Giordano, *The Virtual Emotion Loop: Towards Emotion-Driven Product Design via Virtual Reality*, [w:] E. Ziemba, W. Chmielarz (red.), *Information Technology for Management: Business and Social Issues. FedCSIS-AIST ISM 2021, Lecture Notes in Business Information Processing, LNBIp 2021*, vol. 442, s. 371–378.

52 Tamże, s. 374.

53 M. Dixen, D. Diers, B. Wingert, A. Hatzipanayioti, B. Mohler, O. Riedel, M. Bues, *Distributed, Collaborative Virtual Reality Application for Product Development with Simple Avatar Calibration Method*, Conference Proceedings, 26<sup>th</sup> IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR, Osaka, Japan 2019, s. 1299–1300.

zaburza procesy społeczne, choćby dlatego, że osoby, z którymi się współpracuje, mogą wyglądać nie do końca tak jak w rzeczywistości. Z pewnością skutkuje to percepcją współpracowników i ma wpływ na efekt synergetyczny pracy całej grupy. Oddziaływanie różnych form komunikacji na percepcję pracownika przedstawia tabela 17. Problem awatarów i ich wpływu na współpracę zespołu projektowego jest więc ciekawym obszarem do podjęcia badań.

Interesujące badania na temat VR przedstawili Berg i Vance<sup>54</sup>. Autorzy przebadali obiekty VR oraz przeprowadzili wywiady z praktykami i użytkownikami VR na przełomie 2014 i 2015 roku. Na początku badań w odwołaniu do literatury stworzono listę konkretnych branż przemysłowych, które wykorzystują VR.

**Tabela 17.** Wybrane kanały komunikacji w aspekcie środowiska komunikacji

Środowisko komunikacji	Forma komunikacji				Środowisko
	Słowa	Dialog	Głos	Mowa ciała	
<b>Osobiste spotkania</b>	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
<b>Wideokonferencje</b>	TAK	TAK	TAK	TAK	–
<b>Telefon</b>	TAK	TAK	TAK	–	–
<b>Czat</b>	TAK	TAK	–	–	–
<b>Mail</b>	TAK	–	–	–	–
<b>VR</b>	TAK	TAK	TAK	–	–

**Źródło:** H. Baltzerkiewitz, C. Stechert, *Use of Virtual Reality in Product Development by Distributed Teams*, *Procedia CIRP*, 30<sup>th</sup> CIRP Design 2020, Pretoria, RPA, vol. 91, s. 578.

Następnie dokonano przeglądu stron internetowych głównych producentów rozmaitych technologii VR, biorąc pod uwagę dynamikę rozwoju tych organizacji oraz opinie klientów. W badaniach uwzględnione zostały także te organizacje, które były wskazywane przez badane przedsiębiorstwa jako warte zanalizowania. W ten sposób ostateczna próba badawcza zatrzymała się na 50 obiektach VR z następujących branż:

- samochodowej – 30%,
- wojskowej – 15%,
- lotniczej – 15%,
- rolniczej – 15%,
- energetycznej – 10%,
- budowlanej – 10%,
- dóbr konsumpcyjnych – 5%.

<sup>54</sup> L. Berg, J. Vance, *Industry Use of Virtual Reality in Product Design...*, s. 4–13.

Uczestnicy badania zostali podzieleni na pięć podstawowych kategorii, co w ciekawy sposób unaocznia, jakie są główne zadania stawiane przed pracownikami przedsiębiorstw wykorzystującymi VR:

- projektanci (przygotowują cyfrowy kontekst VR, tworząc całe wirtualne środowisko, włączając w to interakcje czy też animacje, do tego celu pozyskując, konwertując i poprawiając dane wejściowe),
- operatorzy (przygotowujący sprzęt VR do bieżących zadań, wspomagający użytkowników w interakcji z systemem i personalizujący go pod kątem wymagań użytkownika),
- użytkownicy (użytkujący VR w celu osiągnięcia konkretnych korzyści),
- konserwatorzy (ich zadaniem było konfigurowanie, kalibrowanie, aktualizowanie oprogramowania i sprzętu VR, a także rozwiązywanie bieżących problemów oraz poszukiwanie nowych technologii),
- menadżerowie (zarządzający projektami VR przy równoczesnej kontroli kwestii finansowych).

Wśród przebadanych obiektów VR dominowały systemy typu CAVE (ok. 35%), PWLL (ok. 32%), HMD (ok. 19%) oraz rozwiązania przenośne (14%)<sup>55</sup>.

Wyniki badań Berga i Vance<sup>56</sup> pokazały dość dużą rozbieżność w kwestii wykorzystania VR w procesach projektowania wyrobów. VR wykorzystywana jest jako doskonalenie wybranych procesów lub ich fragmentów. Niemniej były także przedsiębiorstwa, w których stanowiła ona zintegrowaną i zaplanowaną z dużym wyprzedzeniem część procesu. Znaczna liczba wykorzystania VR w projektowaniu wyrobów przypadała na wczesne fazy projektowania, np. fazę koncepcyjną, ale nie było to regułą. Do najważniejszych zalet wykorzystywania VR w procesach projektowania wyrobów autorzy zaliczyli możliwości:

- oceny widoczności i podglądu wnętrza (np. w przemyśle samochodowym w celu właściwego rozmieszczenia i doboru słupków, które nie mogą znacznie ograniczać widoczność),
- oceny ergonomicznej (np. w zakresie zasięgu i dostępu do wybranych elementów – wejście do ciągnika rolniczego),
- poczucia przestrzeni w wirtualnym środowisku – VE (np. umiejscowienie wybranych przycisków sterujących w samochodzie weryfikowane następnie w środowisku CAVE),
- oceny jakości estetyki (np. ocen jakości estetyki projektowanego wyrobu, co pozwala w interaktywny sposób nanosić poprawki doskonalące w VE),
- unaoczniania głównych cech i funkcjonalności produktu projektantom, inżynierom, klientom oraz innym zainteresowanym (np. interaktywny dostęp do opowieści, w której głównym bohaterem jest sam produkt, co umożliwia

55 Na ogół ekran, rzutnik, komputer wraz z myszą oraz dodatkowe akcesoria pozwalające wchodzić w interakcje z wyświetlaną na ekranie rzeczywistością.

56 L. Berg, J. Vance, *Industry Use of Virtual Reality in Product Design...*, s. 6–10.

przedstawienie zamierzeń projektowych w kontekście różnorodnych scenariuszy),

- wizualizacji abstrakcyjnych danych (np. obrazowanie wpływu strumieni powietrza na zachowanie się turbin wiatrowych lub wizualizacja zachowania się wiatru po zetknięciu się z łopatomy wirnika turbiny wiatrowej),
- poprawy komunikacji pomiędzy multidyscyplinarnymi zespołami (w procesie projektowania biorą udział pracownicy posługujący się różnorodnymi sposobami komunikacji – tabele, histogramy, wykresy, arkusze kalkulacyjne, prezentacje, raporty itp.; w wielu wypadkach trudno jest im zrozumieć rozwiązania zaproponowane przez zespół z innej dyscypliny; VR poprawia proces komunikacji w tym zakresie, czyniąc w ten sposób propozycje rozwiązań z danej dziedziny bardziej zrozumiałymi i czytelnymi).

Sam proces wykorzystywania VR ma także swoją strukturę i może składać się z następujących kroków:

- 1) zgłoszenie konieczności wykorzystania VR przez użytkownika (tego typu zgłoszenia mogą być wpisane w cykliczny plan projektowania wyrobów lub inicjowane są wtedy, gdy podczas procesu PD pojawiają się krytyczne problemy),
- 2) pozyskiwanie modelu VR (w wielu przypadkach wykorzystywane są istniejące już modele lub też tworzone od nowa takie, które bazują na identyfikacji potrzeb użytkownika i stworzeniu prawidłowej geometrii),
- 3) opracowanie modelu (załadowanie stworzonej poprzednio geometrii do EV, skonfigurowanie ograniczeń stworzonej VR, dopasowanie fizycznych rekwizytów oraz skonfigurowanie technik interakcji pomiędzy użytkownikiem a VR),
- 4) zaprezentowanie wersji demo modelu (weryfikacja modelu w celu potwierdzenia realizacji założonych przed nim celów),
- 5) walidacja modelu VR (realizacja sesji VR na wybranych użytkownikach w celu przesłania raportu z jej efektów końcowych do wszystkich interesariuszy)<sup>57</sup>.

Należy zaznaczyć, że VR jako narzędzie nieustannie rozwijane w sferze PD wymaga ciągłego kontaktu zainteresowanych (obecnych i przyszłych projektantów) z osiągnięciami nauki i techniki. Al Jahwari wraz ze współautorami poruszyli kwestie wprowadzania technologii immersyjnych w proces kształcenia studentów z obszaru projektowania produktów<sup>58</sup>. W swoich badaniach wspomniani autorzy zapytali studentów zajmujących się projektowaniem produktów o ich dotychczasowe praktyki w zakresie używanych podczas projektowania technik, narzędzi, oprogramowania,

<sup>57</sup> Tamże, s. 10–12.

<sup>58</sup> L. Al Jahwari, V. Garaj, D. Harrison, *Embedding Immersive Technologies into Product Design Education: Students' Awareness of Virtual Reality as A Tool to Support the Development of Design Solutions*, Proceedings, 24<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Product Design Education: Disrupt, Innovate, Regenerate and Transform, E and PDE 2022, EPDE2022/1107, London, Great Britain 2022.

sprzętu komputerowego oraz czasu trwania całego procesu dla trzech wybranych przykładów (filiżanki, krzesła i kielicha). Sam proces rozpatrywany był od zarysu koncepcji do prototypowania ostatecznego rozwiązania.

Z przeprowadzonych przez Al Jawahriego oraz współautorów badań wynika, że w większości przypadków studenci wykorzystują w procesie szkicowania wstępnego tradycyjną technikę papierową (ok. 58% odpowiedzi). Nieco rzadziej, choć także często stosowane jest szkicowanie przy wykorzystaniu komputera i myszy komputerowej jako interfejsu – ok. 30%. Tablety graficzne oraz inne techniki są używane łącznie przez 12% (6% to tablety graficzne i 6% inne techniki). Podczas finalizacji całego konceptu maleje udział wykorzystywania techniki papierowej (39%) przy jednoczesnym wzroście pracy na komputerach (40%) oraz tabletach graficznych (15%)<sup>59</sup>. Częstsze użycie narzędzi IT w późniejszych fazach projektowania potwierdzają też wcześniejsze badania, np. Aldoya i Evansa<sup>60</sup>. Modelowanie i renderowanie bierze swój początek od standardowego szkicu wykorzystującego papier oraz ołówki, aby w kolejnym etapie przenieść całość prac związanych z ostateczną częścią tego procesu do oprogramowania typu CAD (np. Fusion 360, 3Ds Max, Solid works itp.). Samo renderowanie odbywa się także przy użyciu oprogramowania (np. Adobe Photoshop, Adobe Illustrator itp.), nie jest do tego celu wykorzystywana VR.

Z dalszych wyników badań wyłania się raczej tradycyjny obraz projektowania wyrobów. Dla przykładu w fazie prototypowania w ponad 80% przypadków studenci używają klasycznych materiałów takich jak papier, karton, drewno, plastyczna glina, pianka lub kombinacji różnorodnych materiałów. W przypadku fazy końcowej badani przenosili swoje prace do aplikacji typu CAD oraz wykorzystywali druk 3D w celu symulacji wybranych cech projektowanego wyrobu. Autorzy zwrócili także uwagę, że pojawiały się odpowiedzi wskazujące na wykorzystanie VR dla tej fazy projektu, ale stanowiły one mniejszość. Podobnie wygląda kwestia oceny prac projektowych, która w większości przypadków bazuje bądź to na samoocenie, wspólnej ocenie, bądź to na ocenie z przełożonym. Nie sięga się tu do VR jako narzędzia wspomagającego ten proces<sup>61</sup>.

Brak powszechnego wykorzystywania VR w projektowaniu produktu przez studentów może wynikać z faktu, że – jak pokazują badania Al Jahwariego i współautorów – ok. 45% badanych nie korzystało wcześniej z technologii VR – ok. 47% respondentów udzieliło odpowiedzi twierdzącej głównie w odniesieniu do gier komputerowych oraz edukacji. W porównaniu do wspomnianych już wcześniejszych badań Aldoya i Evansa, liczba studentów z Wielkiej Brytanii korzystająca z technologii VR znacznie wzrosła – w 2011 roku odsetek osób, które nie miały kontaktu z VR wynosił 71%. Z tego powodu dalsza część badań odnosiła się głównie do

59 Tamże, s. 3.

60 N. Aldoy, M. Evans, *A Review of Digital Industrial and Product Design Methods in UK Higher Education*, „The Design Journal” 2011, vol. 14(3), s. 343–368.

61 L. Al Jahwari, V. Garaj, D. Harrison, *Embedding Immersive Technologies...*, s. 3–4.



postrzegania przez studentów możliwości wykorzystywania VR w pracach projektowych, a także do kwestii nauczania wykorzystania VR i PD. W obu przypadkach odpowiedzi wskazywały na to, że VR może być przydatna (choć nie we wszystkich projektach) w różnych fazach PD, a dodatkowo VR powinno stanowić element nauczania przyszłych projektantów przemysłowych<sup>62</sup>.

Podsumowując, należy zauważyć, że VR wraz z VE stwarzają dotychczas niedostępne możliwości postrzegania zmysłami człowieka wirtualnych produktów, części, podzespołów, przestrzeni itp., które w normalnych warunkach wymagałyby stworzenia fizycznego prototypu, co z pewnością byłoby bardzo kosztowne. Z zaprezentowanego przeglądu literatury wyłania się także kwestia ograniczeń wykorzystania VR w praktyce. Póki co jest to dość czasochłonna technologia (budowanie modelu VE), wymagająca często kosztownego sprzętu. Ponadto doskonalenie istniejącej infrastruktury VR powoduje, że praktycznie z roku na rok pojawiają się nowe modele, np. HMD, które mogą wykorzystywać funkcjonalności niewystępujące w poprzednich wersjach sprzętu. Berg i Vence<sup>63</sup> zwrócili uwagę na kilka wyzwań, które stoją przed badaniami VR, zaliczając do nich:

- doskonalenie grafiki oraz jasności wyświetlania,
- stworzenie możliwości symulowania środowiska otaczającego wyrób (np. zachowanie się wyrobu w kontekście zjawisk pogodowych takich jak śnieg, deszcz, mgła),
- ułatwienie, a przez to przyspieszenie procesu konwertowania modeli VR (rozwiązaniem może być stworzenie spójnej metody zarządzania geometrią w całej firmie),
- automatyczne przygotowywanie modelu w kontekście kolorów, tekstury, kinematycznych interakcji, właściwości i cech materiałów,
- rozszerzenie pola widzenia technologii HMD, która poprzez swoje zawężenia tworzy nienaturalne ruchy głowy,
- udoskonalenie wykrywania kolizji oraz urządzeń dotykowych (wysoka rozdzielczość urządzeń dotykowych umożliwi lepsze zrozumienie, w jaki sposób następuje fizyczne oddziaływanie poszczególnych części),
- zwiększenie podatności transportowej laboratoriów VR w celu wzrostu liczby potencjalnych jej użytkowników.

Jak widać, perspektywy rozwoju VR są dość duże, co wynika z niedoskonałości wielu jej elementów. Zastosowanie jej w procesach PD jest także oczywiste, choć na dziś jeszcze w wielu przypadkach nie wydaje się ekonomicznie uzasadnione.

W kolejnym rozdziale opisany zostanie kontekst PD na tle dwóch kolejnych nowoczesnych technologii, tj. Internetu Rzeczy (IoT) oraz sztucznej inteligencji (AI).

<sup>62</sup> Tamże, s. 5–6.

<sup>63</sup> L. Berg, J. Vance, *Industry Use of Virtual Reality in Product Design...*, s. 16.

### 4.3. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście Internetu Rzeczy

Kolejną omawianą technologią I 4.0 w kontekście PD jest IoT, będąca interakcją pomiędzy fizycznymi obiektami (samochodami, budynkami, sprzętem AGD itp.), zwanymi często połączonymi albo inteligentnymi urządzeniami, lub innymi obiektami posiadającymi układy elektroniczne, oprogramowanie, łączność oraz czujniki a producentem danego sprzętu, jego użytkownikiem, operatorem bądź innymi fizycznymi obiektami. IoT umożliwia zatem zarządzanie obiektami poprzez zdalny dostęp do nich przy użyciu Internetu, ale także daje szansę na zbieranie danych związanych z użytkowaniem produktami. Stwarza to możliwość na bezpośrednią integrację dwóch światów – fizycznego i komputerowego. W ten sposób powstają inteligentne domy, miasta, transport itp. Praktycznie każda fizyczna rzecz może być identyfikowalna przez odpowiednie systemy komputerowe, jeżeli współdziała w ramach globalnej sieci Internet<sup>64</sup>.

W 2013 roku międzynarodowa organizacja standaryzacji IoT (*The Global Standards Initiative on Internet of Things* – IoT-GSI) określiła tę technologię jako globalną infrastrukturę społeczeństwa informacyjnego umożliwiającą świadczenie zaawansowanych usług, wykorzystujących połączenie sieciowe zarówno fizycznych, jak i wirtualnych obiektów. IoT bazuje na istniejących i rozwijających się interoperacyjnych technologiach ICT<sup>65</sup>.

Na wstępie należy zwrócić uwagę, że w trakcie przeszukiwania baz abstrakto-bibliometrycznych WoS oraz SCP liczba pozycji dotyczących IoT w PD była zdecydowanie najmniejsza i liczyła jedynie 13 pozycji. Najstarsze z analizowanych obiektów literaturowych pochodziły z lat 2011–2012 i dotyczyły badań nad platformą wspólnego projektowania produktów w kontekście Internetu Rzeczy<sup>66</sup>. Autorzy obydwu opracowań podkreślili konieczność wielodyscyplinarnej współpracy podczas procesu PD, która to usprawnia proces decyzyjny. Fakt globalizacji doprowadza często do sytuacji, kiedy rozproszenie geograficzne poszczególnych działów biorących udział w pracach PD może stanowić poważną barierę realizacji prac projektowych. Wiąże się z tym jeszcze wiele innych kwestii, takich jak różnorodność używanych systemów informatycznych, narzędzi inżynierskich czy też samych metod komunikacji. Wykorzystywane technologie ICT, bazujące na Internecie, pozwalają

64 Z. Gacovski (red.), *Internet of Things*, Oakville 2019, s. XXV.

65 <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx> [dostęp: 8.09.2023].

66 J. Zheng, H-X. Yan, *Study on The Construction of Distributed Collaborative Product Design Platform Based on The Internet of Things*, International Conference on Electrical, Information Engineering and Mechatronics, EIEM, London–New York 2011; J. Zheng, Y. Feng, *Study on The Collaborative Product Design Platform in The Context of The Internet of Things*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet, Yichang, China 2012.

realizować współpracę nad projektem z różnych miejsc świata, a systemy typu CAD coraz częściej posiadają funkcjonalności wspierające taką współpracę. IoT czyni ją jeszcze bardziej skuteczną, ponieważ oprócz samej komunikacji pomiędzy projektantami możliwa jest telemetria parametrów produktu, np. podczas jego użytkowania. Wykorzystując systemy RFID, aplikacje mobilne, telefony komórkowe, czujniki, tagi, siłowniki itp., IoT stwarza możliwości monitorowania parametrów produktu przez cały cykl jego życia, dając projektantom w różnych geograficznie miejscach możliwość analizowania i doskonalenia wyrobów. Aby technologia IoT w aspekcie PD mogła być wdrożona, potrzebne jest wzięcie pod uwagę następujących założeń:

- stworzenie modelu informacji o produkcie uwzględniającego konieczność monitorowania większości jego części i podzespołów na wspólnej platformie projektowej, ale także udostępnienie takich informacji stronom trzecim, mając świadomość, że niektóre z tych danych mogą być poufne; dotyczy to całej sfery projektowania, wytwarzania, użytkowania, ale także i odbierania zużytych produktów z rynku,
- stworzenie modelu zabezpieczeń procesu PD w warunkach IoT poprzez systemy autoryzacji oraz zabezpieczenie procesu integracji danych.

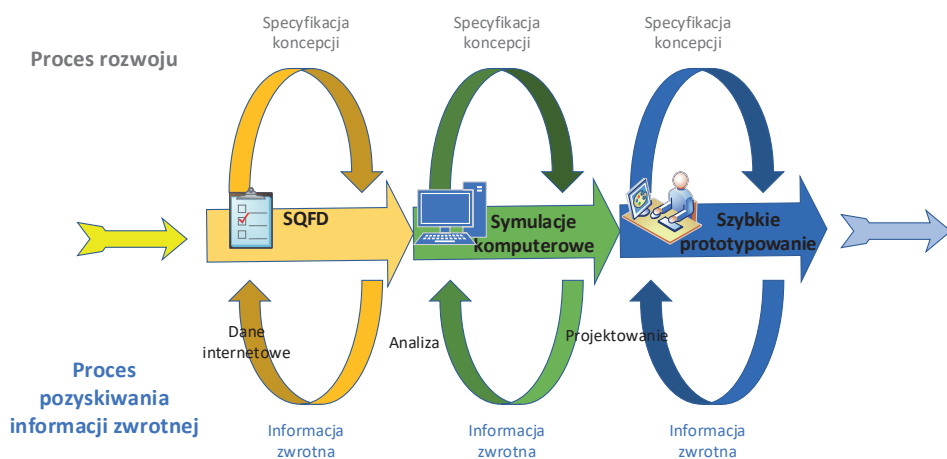
Zheng i Feng zaproponowali także model platformy współpracy nad projektowaniem produktu (*Collaborative Product Design Platform* – CPDP) bazującej na IoT<sup>67</sup>. Platforma ta składa się z czterech poziomów:

- **interfejsu aplikacji** – wspólnego dla wszystkich projektantów biorących udział w pracach projektowych i pomagającego im w pracy przy wykorzystaniu komputerów oraz Internetu,
- **chmury platformy oraz magazynów danych**, w których gromadzone są i przetwarzane informacje dotyczące projektowania oraz użytkowania produktu, skategoryzowane w dwie grupy projektów, a mianowicie dwuwymiarowe (2D) oraz trójwymiarowe (3D); pierwsze wykorzystywane są na wczesnych etapach prac, drugie w fazach końcowych; obróbka danych odbywająca się w chmurze platformy CPDP (gromadzenie, przetwarzanie, wybieranie, formułowanie ograniczeń, generowanie rozwiązań itp.) zapisywana jest w bazie danych,
- **przekazywania danych**, czyli moduł programu wyposażony w interfejs aplikacyjny oraz odczytowy, wykorzystujący bazy danych: sprzętowe, części zamiennych, materiałów, projektów itp.
- **zasobów sprzętowych**, czyli systemów RFID, komunikacji zbliżeniowej typu NFC (*Near Field Communication*), elektronicznych kodów produktów (*Electronic Product Code* – EPC), bram dostępowych, inteligentnych terminali czy też czujników wizyjnych.

Struktura takiej platformy umożliwia dostarczanie ogólnych informacji dotyczących produktu wszystkim zainteresowanym, w tym dostawcom. Pozwala to na skuteczne zarządzanie procesem projektowania produktu oraz jego doskonalenia przy wykorzystaniu informacji pozyskanych poprzez komunikowanie się np. części produktów z centralną bazą.

67 J. Zheng, Y. Feng, *Study on The Collaborative Product Design...*, s. 4–5.

Kim wraz ze współautorami<sup>68</sup> zauważają, że zapoczątkowana w 2010 roku era hiperłączości tworzy coraz to nowsze technologie komunikacji dla hiperpołączonych społeczności, ale również dla rzeczy. Technologie komunikacji pomiędzy pojazdami (*Vehicle-to-Vehicle* – V2V), a także pomiędzy pojazdami i infrastrukturą, z której korzystają (*Vehicle-to-Infrastructure* – V2I), realizowane w ramach systemów cyberfizycznych (CPS) tworzą wspólnie zręby komunikacji między maszynami (*Machine-to-Machine* – M2M). Sama komunikacja M2M generuje automatycznie informacje, które są przekazywane użytkownikom w procesach ich zbierania, analizowania, wyuczania oraz udostępniania z maszyn podłączonych do Internetu. Wspomniani autorzy prezentują metodę inteligentnego projektowania produktów metodą elementów skończonych (*Smart Product Design-Finite Element Analysis* – SPD-FEAP) oraz poszerzają metodę planowania funkcji jakości (*Quality Function Deployment* – QFD) o wykorzystanie danych ze stron internetowych, nazywając nową metodę inteligentnym planowaniem funkcji jakości (*Smart Quality Function Deployment* – SQFD) (rysunek 35).



**Rysunek 35.** Proces inteligentnego projektowania produktów metodą elementów skończonych (SPD-FEAP)

**Źródło:** J. Kim, S. Sul, J. Choi, *Development of User Customized Smart Keyboard Using Smart Product Design-Finite Element Analysis Process in the Internet of Things*, „ISA Transaction: The Journal of Automation” 2018, vol. 81, s. 232.

Jak widać na rysunku 35, danymi wsadowymi do procesu projektowania są dane internetowe, a cały proces, poczynając od koncepcji poprzez specyfikację, na szybkim prototypowaniu kończąc, połączony jest sprzężeniami zwrotnymi. Wymagają one

<sup>68</sup> J. Kim, S. Sul, J. Choi, *Development of User Customized Smart Keyboard Using Smart Product Design-Finite Element Analysis Process in the Internet of Things*, „ISA Transaction: The Journal of Automation” 2018, vol. 81, s. 231–232.

ciągłego pozyskiwania wymagań klientów, wykorzystując do tego celu także elementy IoT pozwalające identyfikować potrzeby klientów z aktualnie użytkowanych przez nich urządzeń. Wszystko to po to, aby projekt mógł sprostać szybko zmieniającym się trendom wysoce skomunikowanych społeczeństw.

Kolejni autorzy, czyli Yerpude i Sighal, zaprezentowali w dwóch artykułach perspektywę zmian w procesach PD ze względu na możliwości wykorzystania IoT<sup>69</sup> oraz opisali zjawisko zwiększania efektywności opracowania nowych produktów dzięki wykorzystaniu danych pochodzących z IoT<sup>70</sup>.

W pierwszym artykule Yerpude i Sighal zwracają uwagę na fakt, że Internet oraz IoT kompleksowo zmieniły dotychczasowe podejście do procesów projektowania. Dostępność danych w czasie rzeczywistym pozwala projektantom stale uczyć się podczas procesu projektowania wyrobów, co z pewnością upraszcza skomplikowane procesy z obszaru PD. Autorzy zauważają, że IoT generuje szanse dla biznesu w czterech podstawowych obszarach:

- iteracji (poprzez zbieranie danych z urządzeń wyposażonych w sensory oraz transfer danych; możliwe jest natychmiastowe działanie związane z doskonaleniem istniejących wyrobów i projektowaniem nowych w formule działań ciągle powtarzalnych; spływające dane doprowadzają do zmian, które generują nowe dane),
- mikrosegmentacji (możliwość identyfikacji poprzez urządzenia nietypowych zachowań konsumentów pozwala określać ich wymagania w bardzo specyficznych i charakterystycznych segmentach rynku; zwiększa to możliwość personalizacji produktów według życzeń klientów i tworzy mikrosegmenty rynkowe),
- ciągłego doskonalenia produktu (fakt otrzymywania danych w czasie rzeczywistym, dotyczących użytkowania produktu pozwala wprowadzać zmiany w trakcie cyklu jego życia, oczywiście, o ile technicznie urządzenie jest na to gotowe; nie ma potrzeby zatem czekać na kolejną wersję produktu, gdyż IoT umożliwia doskonalenie tej już istniejącej – zamiast amortyzacji następuje wzrost wartości produktu w jego całym cyklu życia),
- wzrostu jego złożoności (łączenie pozyskiwanych danych wraz z zewnętrznymi danymi od podmiotów współpracujących z organizacją umożliwia osiągnięcie niespotykanego dotychczas efektu synergii w procesie PD, przedsiębiorstwo wydobywa w ten sposób pełen potencjał możliwości doskonalenia produktu).

Wszystkie te działania, a przede wszystkim pozyskiwane dane, w sposób jednoznaczny mają wpływ na koszt i czas całego cyklu życia produktu (PLC). Zwiększenie

69 S. Yerpude, T. Singhal, *New Product Development – A Transformational Perspective with Internet of Things*, „International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)” 2019, vol. 8 (4C), s. 78–85.

70 S. Yerpude, T. Singhal, *Enhancing New Product Development Effectiveness with Internet of Things Origin Real Time Data*, „Journal of Cases on Information Technology” 2018, vol. 20(3), s. 21–35.

szybkości podejmowania decyzji wpływa na obniżenie wspomnianych kosztów. Dane z procesu użytkowania wyrobów pozwalają często korygować błędy oprogramowania, skracając czas reakcji na usterki – proaktywne działania jakościowe<sup>71</sup>.

W drugim artykule<sup>72</sup> Yerpude i Sigal skoncentrowali się na pozyskiwaniu danych w czasie rzeczywistym, tzn. ich gromadzeniu u źródła i wykorzystaniu w modelu biznesowym, co pozwala przyspieszyć proces podejmowania decyzji. Samo gromadzenie danych wspierane jest przez ekosystem IoT, który np. poprzez czujniki może autonomicznie zbierać dane i przysyłać je do ustalonych miejsc. W ten sposób sam przesył pakietów danych odbywa się niesłyszalnie szybko w skali globalnej, pomijając czaso- i kosztochłonny proces zbierania wymagań klientów.

Z kolei Zheng wraz ze współautorami opisują pojęcie przemysłowego IoT (*Industrial Internet of Things* – IIoT). Według nich IIoT to wszechobecna sieć różnorodnych technologicznie czujników oraz technologii komunikacyjnych, umożliwiających inteligentne przetwarzanie informacji i inteligentne zarządzanie przedsiębiorstwami<sup>73</sup>. PD oparty na danych w czasie rzeczywistym jest jednym z ważniejszych scenariuszy wykorzystania IoT, które pozwalają znaleźć rozwiązanie satysfakcjonujące klienta. W swoim opracowaniu autorzy zaprezentowali trzy warstwy architektury IIoT zorientowanej na sferę usług, tj. warstwę:

- percepcyjną (integrującą różnorodne rodzaje środowisk czujników, łączącą fizyczne urządzenia fabryczne poprzez różnorodne technologie czujników, czytników oraz innych rozwiązań pozwalających akumulować dane dotyczące procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym),
- zarządzania (podejmowania decyzji na podstawie zagregowanych danych),
- usług (dostarczającą rozwiązania technologiczne i usługi pozwalające pozyskiwać dane od użytkowników lub klientów, aplikacje umożliwiające zdalne monitorowanie procesów, analizowanie bieżącej wydajności, diagnozowanie usterek lub też kontrolę jakości).

Warstwa percepcji dostarcza niezbędne dane do warstwy zarządzania poprzez Internet lub Intranet. Ta z kolei przekazuje dane do warstwy usług, przygotowując konkretne rozwiązania technologiczne, które pozwolą zarządzać całym procesem.

Bardzo ciekawą perspektywę IoT zaprezentował Neerugatti wraz ze współautorami<sup>74</sup>. Ukazali oni istotę IoT jako swoiste porównanie świata realnego i wirtualnego w aspekcie ludzkiej perspektywy oraz kontekstu IoT, opierając je na cyklu: odczyt-analizuj-działaj (*Sense-Analyze-Act Cycle* – SAAC) (tabela 18).

71 S. Yerpude, T. Singhal, *New Product Development – A Transformational Perspective...*, s. 80–81.

72 S. Yerpude, T. Singhal, *Enhancing New Product Development Effectiveness...*, s. 21–23.

73 H. Zheng, Y. Feng, Y. Gao, J. Tan, *A Robust Predicted Performance Analysis Approach for Data-Driven Product Development in The Industrial Internet of Things*, „Sensors” 2018, vol. 18(9), s. 1–2.

74 V. Neerugatti, K. Baseer, M. Jahir Pasha, V. Satish Kumar, *Internet of Things: A Product Development Cycle for The Entrepreneurs*, „HELIX” 2020, vol. 10(2), s. 155–160.



**Tabela 18.** Cykl odczuj–analizuj–działaj z perspektywy człowieka i IoT<sup>75</sup>

Perspektywa człowieka	Perspektywa IoT
<b>Zmysły</b>	<b>Czujniki</b>
widzieć, dotykać, słyszeć, wąchać, smakować	PIR, LDR, HEAT, wibracje itp.
<b>Mózg</b>	<b>Mikroprocesor/Mikrokontroler</b>
analiza informacji	Arduino/Node MCU/Raspberry pi
<b>Odpowiedź</b>	<b>Siłowniki/Humanoidy</b>
mowa, pismo, ruch itp.	wentylatory/klimatyzacje/lodówki, ale także mowa, pismo, ruch itp.

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie V. Neerugatti, K. Baseer, M. Jahir Pasha, V. Satish Kumar, *Internet of Things: A Product Development Cycle for The Entrepreneurs*, „HELIX” 2020, vol. 10(2), s. 156.

W tabeli 17 autorzy przyporządkowali trzem podstawowym ludzkim perspektywom ich substytuty ze świata cyfrowego, a mianowicie zmysłom – czujniki, mózgowi – mikroprocesory oraz mikrokontrolery, a reakcjom – mechanizmy, siłowniki i napędy.

Na tej podstawie zaproponowali oni techniczny cykl rozwoju produktu wykorzystujący IoT i składający się z następujących warstw:

- sprzętowej (*hardware*) – określany jest tutaj schemat obwodu wraz z obsługującymi go czujnikami, jednostką sterującą oraz siłownikami, co pozwala na wytworzenie płytki obwodu drukowanego (*Printed Circuit Board* – PCB),
- oprogramowania (*software*) – zależna od wymagań klienta, wyposaża płytkę w odpowiednie oprogramowanie, następuje tutaj tworzenie algorytmów i kodów,
- chmury obliczeniowej (*Cloud*) – utworzenie miejsca, w którym będą dane oraz integracja sprzętu i oprogramowania IoT z osadzoną w chmurze platformą,
- testowej – następuje tu weryfikowanie, czy zintegrowany razem sprzęt i oprogramowanie spełniają założone wymagania klientów, sprawdzana jest tutaj także łączność z chmurą gromadzącą dane oraz aplikacjami mobilnymi,
- aplikacji Android – przygotowanie aplikacji obsługującej zdalne sterowanie i monitorowanie z ergonomicznym interfejsem dla wszystkich użytkowników,
- rozwoju produktu – przygotowany technicznie produkt otrzymuje swój wygląd zewnętrzny, czyli obudowę,
- pakowania – pakowanie produktu wraz z niezbędnym osprzętem oraz instrukcjami,
- marketingu – działania mające wypromować i sprzedać produkt na rynku.

<sup>75</sup> PIR – pasywny czujnik podczerwieni, LDR – rezystor zależny od światła (czujnik światła), HEAT – czujniki temperaturowe, Vibration – czujniki wibracji, Arduino – platforma obliczeniowa, Raspberry Pi – miniaturowy komputer wielkości karty kredytowej, NodeMCU – platforma IoT typu *OpenSource*.



Warstwy sprzętowa, oprogramowania, chmury obliczeniowej, testowa, aplikacji Android oraz rozwoju produktu współgrają ze sobą na podstawie sprzężeń zwrotnych, uzupełniając proces projektowania o niezbędne poprawki. W ten sposób ostatecznie powstały produkt powinien spełniać wymagania klienta<sup>76</sup>.

Ciekawym obszarem badawczym są też kwestie nadających się do noszenia urządzeń obsługujących IoT. Zhou<sup>77</sup> dokonał ich przeglądu, dzieląc je według możliwości umieszczenia na ciele człowieka – wyróżnił zatem urządzenia noszone na głowie, ręce, stopach, klatce piersiowej czy też mięśniach rąk lub ud. Wykorzystywane technologie mogą być odrębnymi urządzeniami, które użytkownik zakłada na swoje ciało, ale mogą stanowić też rodzaj tatuaży naklejanych na skórę i funkcjonujących jako urządzenia IoT. Wykorzystują one szereg dodatkowych technologii, takich jak mikroczujniki, multimedia, biometrikę, elastyczne wyświetlacze, pozycjonowanie przy użyciu globalnego systemu pozycjonowania (*Global Positioning System* – GPS), AR/VR oraz wiele innych. Sama łączność odbywać może się poprzez różnego rodzaju interakcje, np. gestów, śledzenia ruchu gałek ocznych, rozpoznawania mowy, interakcji mózg–komputer uwzględniających kontekst lub interakcji wielodotykowych. Autor zwraca uwagę na trzy podstawowe kategorie problemów występujących podczas użytkowania inteligentnych, przenośnych produktów, zaliczając do nich:

- brak doświadczenia wynikającego z użytkowania tego typu wyrobów (pierwsze gogle oferowane przez Google bardzo mocno nagrzewały głowę użytkownika i nie dostarczały oczekiwanych efektów) lub zbyt mała pamięć urządzeń powodująca spowolnienie ich działania,
- kwestie prywatności (zbierane w procesie użytkowania podręcznych wyrobów dane o ich właścicielach często stają się łupem hakerów lub po prostu wyciekają do Internetu w niekontrolowany sposób),
- kwestie zużycia energii (w tej chwili ponad 20 mld urządzeń korzysta z IoT<sup>78</sup>, a jeśli chodzi o urządzenia do noszenia, są one niewielkie, co często decyduje o pojemności ich baterii, które muszą być doładowywane).

Dodatkowo dochodzą tutaj jeszcze takie rozwiązania jak egzozoskielet (pancerz na ciele człowieka wspomagający i wzmacniający siłę jego mięśni), technologia holograficzna czy też rozwój w kierunku zielonej energii. Wszystkie te elementy pokazują, że na przykładzie tylko urządzeń przeznaczonych do noszenia zakres zastosowania i wykorzystania IoT jest duży.

76 V. Neerugatti, K. Baseer, M. Jahir Pasha, V. Satish Kumar, *Internet of Things: A Product Development...*, s. 157.

77 X. Zhou, *Research on Wearable Intelligent Product Design Based on Internet of Things Technology*, Proceedings, International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics, CSIA 2021, Zurych, Szwajcaria 2021, s. 700–707.

78 <https://www.money.pl/gospodarka/jak-internet-rzeczy-iot-zmienia-dzisiejszy-biznes-6887253651655616a.html> [dostęp: 13.09.2023].

Benabdellah i Zekhnini dokonali próby odniesienia wybranych rozwiązań DfX do atrybutów jakościowych IIoT oraz BD<sup>79</sup>. Atrybuty jakościowe IIoT bazowały na standardzie ISO 25010 – Inżynieria systemów i oprogramowania – Wymagania jakości dla systemów i oprogramowania oraz ich ocena – Model jakości systemów i oprogramowania oraz normy ISO 25012 definiującej ogólny model jakości danych przechowywanych w ustrukturyzowanym formacie w systemie komputerowym<sup>80</sup>. W sumie zaproponowano osiem kryteriów jakościowych – cztery dla obszaru *BigData* (bezpieczeństwo, adekwatność, użyteczność, kompatybilność). Główne kategorie i podkategorie IIoT przedstawiono w tabeli 19.

**Tabela 19.** Jakościowe atrybuty przemysłowego Internetu Rzeczy

Kategorie				
Podkategorie	Jakość	Kompletność	Rodowód	Ewoluwowalność
	Dokładność	Dostępność	Łatwość dostępu	Modułowość
	Precyzja	Obecność i metadane	Identyfikowalność	Efektywność
	Wiarygodność		Pochodzenie	Trwałość
	Zgodność	Poprawność	Poufność	Modyfikowalność
	Niepewność	–	–	Rozszerzalność

**Źródło:** A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST 2021, Tangier, Morocco 2021, s. 80.

W swoich badaniach wspomniani autorzy wykonali w pierwszej kolejności analizę jakościową polegającą na identyfikacji jakościowych cech IIoT oraz BD wraz z przeglądem literatury dotyczącym zagadnień DfX, BD oraz IIoT. Następnie wykorzystali metodologię rozmytego AHP (analitycznego procesu hierarchicznego – skala od 1, co oznacza równie ważne, do 9, czyli zdecydowanie ważne), który pozwolił przedstawić skalę priorytetów konkretnych techniki DfX z uwzględnieniem atrybutów jakościowych IIoT oraz BD. Benabdellah i Zekhnini swoją pracę podsumowali wytycznymi dla praktyków i menadżerów.

W pierwszym podejściu uwzględniono osiem atrybutów jakościowych oraz 30 technik DfX. Z badań wynika, że najbardziej znaczącymi cechami jakości dla BD oraz IIoT są bezpieczeństwo, jakość, użyteczność, kompletność. Wśród technik DfX, które miały największą wagę wektorową, wybrano projektowanie wspomagające:

79 A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST 2021, Tanger, Morocco 2021, s. 79–84.

80 <https://www.iso.org/standard/35736.html> [dostęp: 13.09.2023].

- jakość (DfQ),
- bezpieczeństwo (DfSS),
- niezawodność (DfR),
- dostępność (*Design for Accessibility* – DfAc),
- testowalność (DfT).

Oznacza to, że jakość, bezpieczeństwo, użyteczność oraz kompletność najczęściej wspierane są przez wymienione wyżej pięć technik DfX<sup>81</sup>.

Kwestią przeglądu problematyki uczenia maszynowego (ML) oraz IoT zajęli się Rahman i współautorzy<sup>82</sup>. Uznali oni, że ML, sieci czujników (*Sensors Networks* – SN) oraz IoT są najważniejszymi technologiami wnoszącymi swój wkład do czwartej rewolucji przemysłowej, a w swojej pracy zajęli się opisem konkretnych protokołów i technologii (np. *Bluetooth Low Energy* – BLE, *Long Range Area Network* – LoRaWAN), czujników (np. RFID, LED) oraz algorytmów (np. *Group Method of Data Handling* – GMDH *Neural Networks* – NN – GMDH-NN), używanych powszechnie w aplikacjach IoT oraz ML. Z kolei Patel i współautorzy przeprowadzili bibliometryczną analizę przeglądu technologii IoT oraz AI w kontekście zasobów lądowych oraz obszarów wodnych<sup>83</sup> co z punktu widzenia projektowania wyrobów nie wnosi zbyt wiele do prezentowanego opracowania. Wang wraz ze współautorami zajął się innowacyjnymi metodami integracji koncepcji marketingowych oraz Art Design<sup>84</sup> w projektowaniu wyrobów w erze IoT<sup>85</sup>. Wskazali oni na możliwość wykorzystania obszaru IoT w takich miejscach jak inteligentne:

- pojazdy,
- środowisko,
- kampusy,
- sieci elektryczne,
- medycyna,
- bezpieczeństwo itp.

81 A. Benabdellah, K. Zekhnini, *Sustainable Product Development: The Intersection of Design...*, s. 82–83.

82 M. Rahman, T. Ghosh, N. Auma, M. Kaiser, M. Anannya, A. Hosen, *Machine Learning, and Internet of Things in Industry 4.0: A Review*, „Measurement: Sensors” 2023, vol. 28.

83 A. Patel, A. Kethavath, N. Kethavath, A. Naorem, M. Jagadale, K. Sheetal, P. Renjith, *Review of Artificial Intelligence, and Internet of Things Technologies in Land and Water Management Research during 1991–2021*, „A Bibliometric Analysis, Engineering Applications of Artificial Intelligence” 2023, vol. 123, s. 1–15.

84 Projektowanie wyrobów ze szczególnym uwzględnieniem aspektów estetycznych przypominających sztukę.

85 H. Wang, N. An, S. Ma, *Innovative Methods for the Integration of Marketing Concepts and Art Design in Product Design in the Era of Internet of Things*, „Wireless Communications and Mobile Computing” 2022, vol. 2022, s. 1–12.

Dla każdego z tych rozwiązań zaproponowano trzy warstwy struktury systemu pozyskiwania danych, tj.: aplikacyjną (platformę gromadzenia danych z IoT),

- sieciową (infrastrukturę, na bazie której działa IoT),
- urządzeń (system kontroli pozyskiwania danych posiadający zdalny dostęp, ustawianie parametrów oraz system informowania o usterkach).

Rahman i współautorzy zwrócili także uwagę na potrzebę przejścia projektantów z tradycyjnego myślenia na sposób myślenia internetowego (*Internet Thinking*), co wiąże się z włączeniem użytkowników w proces PD i stworzeniem szerszego ekosystemu produktów. Stwierdzili, że w dobie Internetu użytkownicy charakteryzują się cechami związanymi z danymi o zachowaniu klientów, co daje projektantom następujące możliwości:

- automatyczną klasyfikację użytkowników do danych grup,
- monitorowanie stylu życia i użytkowania wyrobów,
- dzielenie się swoimi odczuciami,
- analizę dużych zbiorów danych (BDA),
- inną formę zakupu i dostarczania towarów.

Oprócz wyróżnionych cech związanych z zachowaniem Rahman i współautorzy wskazali także jako istotne czynniki konieczność budowania wśród użytkowników poczucia współuczestniczenia w działaniach organizacji, w tym procesach PD, oraz konieczność zwracania uwagi na opinię użytkowników pojawiającą się w sieci<sup>86</sup>.

Możliwości IoT wydają się ograniczone tylko ludzką wyobraźnią lub w dobie sztucznej inteligencji także wiedzą i algorytmami AI. Jak widać, zagadnienia operacyjne związane z IoT dotyczą czujników, architektury, środowiska, protokołów, aplikacji, metod, bezpieczeństwa. Możliwości zastosowania IoT obejmują prawie całą branżę przemysłową – od architektury poprzez sieci energetyczne i zarządzanie miastami, modele biznesowe, produkty codziennego użytku po ochronę zdrowia. Sfera PD zyskuje doskonałe i szybkie narzędzie identyfikacji problemów i szans w użytkowanych wyrobach, co pozwala często na wprowadzanie zmian w czasie rzeczywistym. IoT umożliwia gromadzenie danych z zainstalowanych czujników, które należy poddawać gruntownej analizie realizowanej przez człowieka lub komputery. Jej efektem powinny być wnioski decyzyjne dla projektantów prowadzące do konkretnych zmian w istniejących i nowo produkowanych wyrobach. Powstaje w tym miejscu pytanie retoryczne: Kto szybciej przeanalizuje te olbrzymie zbiory danych – człowiek czy komputer? O ile uwarunkowania pracy człowieka podlegają badaniom już od wielu lat, o tyle sztuczna inteligencja (AI) uwolniona na początku lat dwudziestych XXI wieku pozostaje wielką niewiadomą, której także należałoby się przyjrzeć z punktu widzenia procesów PD. Dlatego kolejny rozdział zostanie poświęcony kwestii AI w kontekście PD.

<sup>86</sup> Tamże, s. 10–11.

## 4.4. Projektowanie i rozwój produktu w kontekście sztucznej inteligencji

Sztuczna inteligencja (AI) jest coraz bardziej wszechobecna w codziennym życiu. Przetwarzanie języka naturalnego, tłumaczenie z języków obcych, rozpoznawanie dźwięków i obrazów, wreszcie tworzenie nowych rozwiązań (muzyki, tekstu itp.) to już pewna normalność. Udostępnienie wykorzystania sztucznej inteligencji dla praktycznie każdego obywatela (np. *Chat Generative Pretrained Transformer* – ChatGPT) otworzyło szereg do tej pory nieznanych możliwości, ale także i zagrożeń, co spowodowało powstanie nowej dziedziny badań wyjaśniających sztuczną inteligencję (*Explainable Artificial Intelligence* – XAI)<sup>87</sup>.

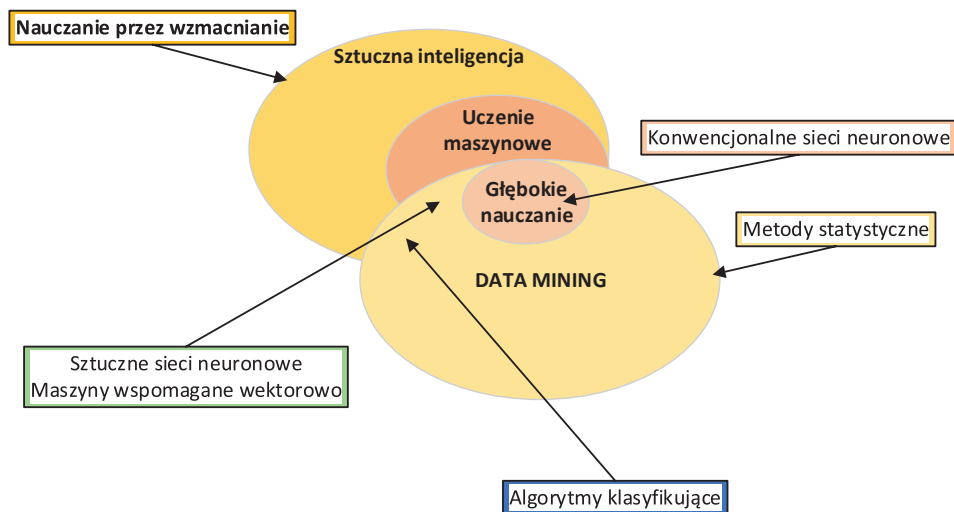
Wyróżnia się trzy typy zastosowań sztucznej inteligencji w projektowaniu i wytwarzaniu produktu, które bazują na eksploracji danych (DM):

- głębokie nauczanie (*Deep Learning* – DL) – element AI i ML działający analogicznie do ludzkiego mózgu, koncentrujący się na symulowaniu sposobu jego pracy w obszarach przetwarzania danych i kreowania wzorców podejmowania decyzji; słowo głębokie oznacza kilka ukrytych warstw sieci neuronowych, które są reprezentantami tego podejścia – sieci neuronowe (*Neural Networks* – NN) lub głębokie sieci neuronowe (*Deep Neural Networks* – DNN); DL – w odróżnieniu od ML – ma możliwość automatycznego wyodrębnienia wysokiego poziomu funkcji ze zgromadzonych danych bez udziału człowieka,
- uczenie maszynowe (ML) – jest zestawem algorytmów wykorzystującym konkretne dane w celu symulowania sposobu uczenia się przez ludzi, co pociąga za sobą stopniowe zwiększanie dokładności; projektuje ona algorytmy w taki sposób, aby systemy mogły uczyć się na podstawie przeszłych danych, wykorzystując dotychczasowe doświadczenie; ciągle dostarczanie do systemu danych doskonali go i optymalizuje pod kątem wydajności; ML wykorzystuje się głównie w celu doskonalenia pracy maszyn; jest podzielone na cztery typy: nadzorowane, częściowo nadzorowane, nienadzorowane, uczenie się przez wzmocnianie<sup>88</sup>,
- sztuczną inteligencję (AI) – inteligentne komputery; ma na celu przeniesienie ludzkiej inteligencji na maszyny; obejmuje zdolności rozumowania, uczenia się,

87 J. Brasse, H. Broder, M. Forster, M. Klier, I. Sigler, *Explainable Artificial Intelligence in Information Systems: A Review of the Status Quo and Future Research Directions*, „Electronic Markets” 2023, vol. 33(26), s. 1–2.

88 Modele algorytmów ML w odniesieniu do stylu uczenia można znaleźć w publikacji: M. Hariri-Ardebili, G. Mahdavi, L. Nuss, U. Lall, *The Role of Artificial Intelligence and Digital Technologies in Dam Engineering: Narrative Review and Outlook*, „Engineering Applications of Artificial Intelligence” 2023, vol. 126, s. 4.

rozwiązywania problemów, wyznaczania celów czy też adaptowania się do danych sytuacji, a także autokorekcji; zasadniczą jej zaletą jest szybkość realizacji tych działań oraz możliwość brania pod uwagę szerszej grupy danych<sup>89</sup> (rysunek 36).



**Rysunek 36.** Zakres pojęciowy terminów AI, ML, DL oraz DM

**Źródło:** B. Gerschütz, S. Goetz, S. Wartack, *AI4PD – Towards a Standardized Interconnection of Artificial Intelligence Methods with Product Development Processes*, „Applied Science” 2023, vol. 13(3002), s. 2.

AI można zdefiniować jako inteligencję wykorzystywaną przez maszyny. Sztuczna inteligencja doprowadziła do sytuacji, w której pozwolono maszynom myśleć, zachowywać się i działać podobnie jak ludziom<sup>90</sup>. W obszarze akademickim AI wiąże się z badaniami nad tym, w jaki sposób komputery funkcjonujące w świecie cyfrowym, dane oraz wspomagające je algorytmy mogą wykonywać zadania i rozwiązywać złożone problemy, które wymagają normalnie inteligencji ludzi lub ją przekraczają. Rozumowanie i zdolność przewidywania konieczne do dostosowywania się do zmieniających się okoliczności przypisane zostały zatem maszynom cyfrowym, co wpisuje się w pierwszą definicję AI użytą przez McCarthy’ego w latach sześćdziesiątych. Zgodnie

89 C. Rath, S. Baral, T. Singh, R. Goel, *Role of Artificial Intelligence and Machine Learning in Product Design and Manufacturing*, Proceedings International Mobile and Embedded Technology Conference, MECON, Noida, India 2022, s. 572; B. Gerschütz, S. Goetz, S. Wartack, *AI4PD – Towards a Standardized Interconnection of Artificial Intelligence Methods with Product Development Processes*, „Applied Science” 2023, vol. 13(3002), s. 2–4.

90 P. Bhatt, A. Muduli, *Artificial Intelligence in Learning and Development: A Systematic Literature Review*, „European Journal of Training and Development” 2023, vol. 47, No. 7/8, s. 677– 678.



z nią AI to nauka i inżynieria tworzenia inteligentnych maszyn. Stąd też często AI pojawia się wspólnie z terminem ML, a samo ML ujmowane jest jako podzbiór AI<sup>91</sup>.

AI opiera się zatem na danych i algorytmach, a jakość danych stanowi ważną podstawę jej funkcjonowania. Jak stwierdza Singh<sup>92</sup>, coraz częściej mówi się o problemie sztucznej inteligencji zorientowanej na dane jako o zbiorze różnorodnych technik działania na danych, które pozwalają systematycznie je poprawiać. Wyróżniono sześć podstawowych aspektów, świadomie lub nieświadomie wykorzystywanych przez badaczy, które mogą poprawiać jakość systemów AI. Zalicza się do nich ocenę jakości BigData, wstępne przetwarzanie danych, naukę przekazywania danych, częściowo nadzorowane uczenie się, operacje uczenia maszynowego (ML) oraz analizę wpływu na dodanie większej ilości danych.

AI ma zatem za zadanie wspierać ludzkie umiejętności rozumowania, planowania, obserwacji, komunikacji itp. w taki sposób, aby można było je wykonywać taniej, wydajniej i skuteczniej. Poszerza i czyni bardziej efektywnym proces odnajdywania wzorców i modeli z agregowanych danych. Wsparcie ze strony inteligentnych agentów, wysoce zautomatyzowana analiza i synteza danych uskuteczniają proces podejmowania decyzji, wprowadzając na rynek takie rozwiązania jak: autonomiczne pojazdy, inteligentna (automatyczna) diagnostyka medyczna czy też obsługa poleceń głosowych bądź gestów poprzez interfejsy człowiek–komputer. Wspiera ona szczególnie takie branże jak handel, bankowość bądź specjalistyczne usługi, np. transport, w których to potrzeba znacznej ilości czasu na zbieranie, gromadzenie i analizowanie danych. W ten sposób AI pozwala przedsiębiorstwom ograniczać koszty i generuje nowe dochody<sup>93</sup>.

Jedne z pierwszych modeli koncepcyjnych rozwoju nowego produktu przy wykorzystaniu AI pochodzą z przełomu 1998 i 1999 roku. Wtedy grupa autorów – Shi, Rao, Nahm wraz ze współautorami – poprowadziła nowatorskie badania, formułując model koncepcyjny PD wspomagany przez AI<sup>94</sup> oraz systemy eksperckie (ES) oraz systemy oparte na wiedzy (*Knowledge-Based Systems* – KBS)<sup>95</sup>. W 1999 roku wspomniani eksperci odnaleźli zaledwie 24 publikacje dotyczące tego zagadnienia, z czego 19 było wydanych przed rokiem 1994. Samą sztuczną inteligencję opisywano od

91 G. Giuggioli, M. Pellegrini, *Artificial Intelligence as an Enabler for Entrepreneurs: A Systematic Literature Review and an Agenda for Future Research*, „International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research” 2023, vol. 29, No. 4, s. 817.

92 P. Singh, *Systematic Review of Data-Centric Approaches in Artificial Intelligence and Machine Learning*, „Data Science and Management” 2023, vol. 6, s. 144.

93 C. Rath, S. Baral, T. Singh, R. Goel, *Role of Artificial Intelligence and Machine...*, s. 572.

94 Z. Shi, A. Nahm, S. Rao, *New Product Development: Stages, Core Elements, and Artificial Intelligence – A Conceptual Model*, *Proceeding, Decision Science Institute, Las Vegas, USA 1998*, s. 1551–1558.

95 S. Rao, A. Nahm, Z. Shi, X. Deng, A. Syamil, *Artificial Intelligence and Expert Systems Applications in New Product Development – a Survey*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 1999, vol. 10(3), s. 231–244.



1994 roku jako narzędzie wykorzystywane we wstępnych etapach procesu PD oraz wspomagające podejmowanie decyzji w projektowaniu współbieżnym wykorzystującym metodę QFD<sup>96</sup>. Zaprezentowane przez wspomnianych badaczy modele koncepcyjne poszerzały analizę rozwinięcia funkcji jakości w wybranych etapach o ES, KBS oraz AI.

Artykuły z pierwszej dekady XXI wieku posiadały w tytułach nazwę AI, jednak nie definiowały one sztucznej inteligencji, ale wskazywały możliwości wykorzystania rozmaitych rozwiązań matematycznych, probabilistycznych, statystycznych, informatycznych itp. w procesach PD. Feyzioglu i Buyukozkan zaproponowali, aby przy ocenie projektów PD bazować na inteligentnych technikach wspomagania decyzji, takich jak sieci neuronowe, modele logiki rozmytej wspomagające decyzje projektantów<sup>97</sup>. Kwestią metody oceny produktu wykorzystującego sztuczną inteligencję zajął się także Shang<sup>98</sup>. Wskazał, że ustalenie praktycznych i wykonalnych wskaźników, mierników oraz wag oceny projektu PD stanowi klucz do rozwiązania problemu. Zdefiniował on AI jako integrację wiedzy z zakresu technologii cyfrowych (informatycznych – IT), psychologii, matematycznych modeli logiki rozmytej oraz wielu innych dziedzin<sup>99</sup>.

Legardeur wraz ze współautorami zaproponowali zintegrowany system informatyczny wspomagający PD, bazujący na technikach metamodelowania rozwoju i dyfuzji innowacji (*Innovation Development and Diffusion* – ID<sup>2</sup>) oraz eksploratora ograniczeń (*Constraint Expolorer* – CE<sub>xp</sub>), co miało wspomagać proces dzielenia się informacjami i wiedzą<sup>100</sup>. Mouelhi wraz ze współautorami zaproponował w ramach podejścia bazującego na AI wykorzystanie multikryterialnej optymalizacji<sup>101</sup>. Kaljun i Dolsak zwrócili uwagę na stosowanie AI w projektowaniu aspektów estetycznych i ergonomicznych produktu<sup>102</sup>. Autorzy stwierdzili, że kwestie estetyczne, nawiązujące do wizualnych aspektów produktu, składają się z elementów sztuki (tworzy kształt produktu), opisywane są za pomocą elementów semantycznych użytkownika lub elementów akceptacji formy (ich celem jest tłumaczenie kompozycji lub jej części zrozumiałym dla użytkownika

96 Tamże, s. 233–235.

97 O. Feyzioglu, G. Buyukozkan, *Evaluation of New Product Development Projects Using Artificial Intelligence and Fuzzy Logic*, „Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology” 2006, vol. 11, s. 183–189.

98 M. Shang, *Artificial Intelligence Product Design Evaluation Method*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE, Hangzhou, China 2010, s. 163–166.

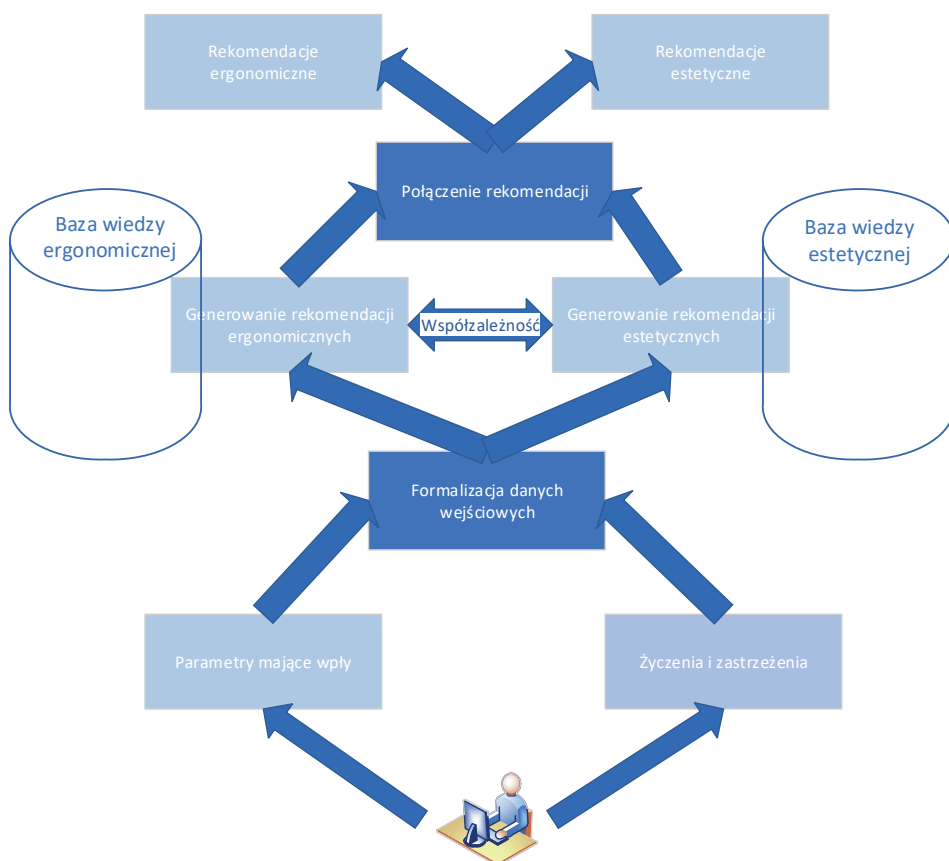
99 Tamże, s. 163.

100 J. Legardeur, C. Merlo, X. Fischer, *An Integrated Information System for Product Design Assistance Based on Artificial Intelligence and Collaborative Tools*, „International Journal of Product Lifecycle Management” 2006, vol. 1(3), s. 211–229.

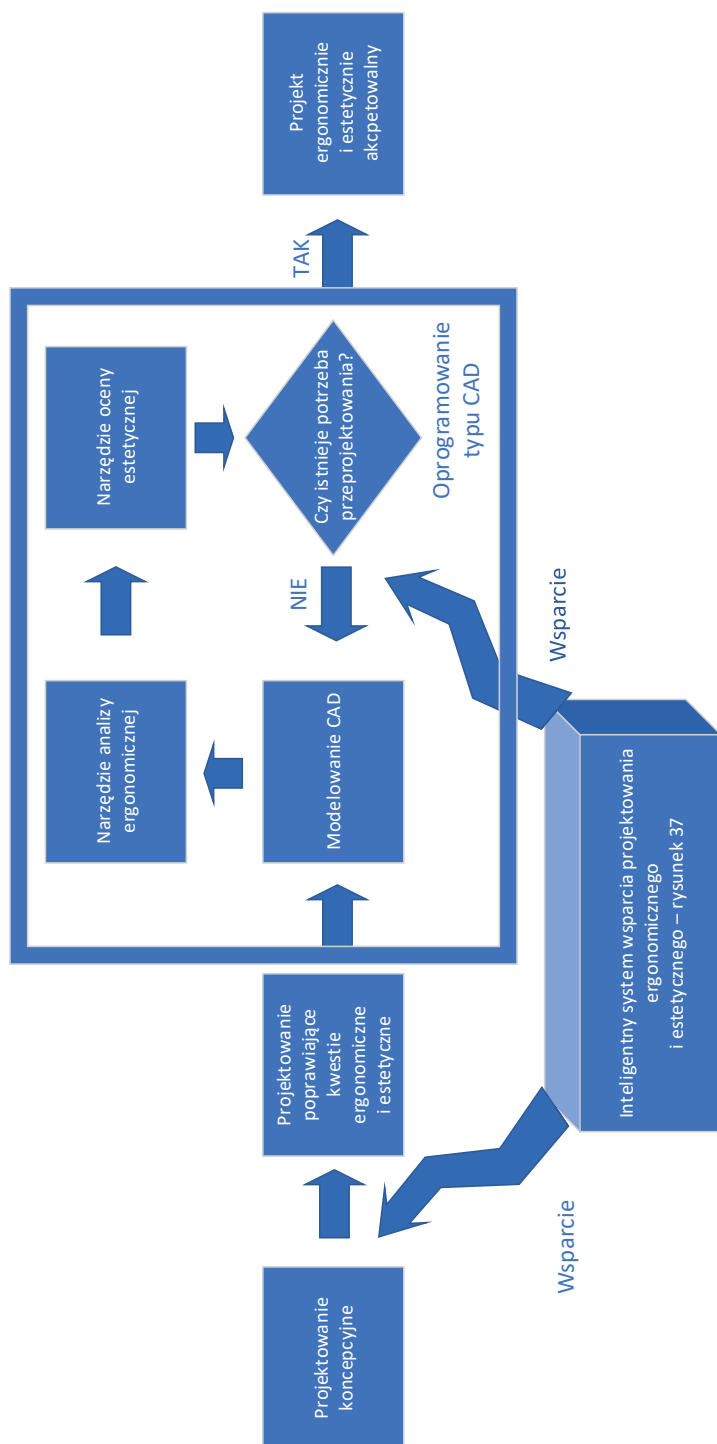
101 O. Mouelhi, P. Couturier, T. Redarce, *An Artificial Intelligence Approach for The Multicriteria Optimization in Mechatronic Products Design*, Proceedings, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA, Jilin, China 2009, s. 1731–1736.

102 J. Kaljun, B. Dolsak, *Artificial Intelligence in Aesthetic and Ergonomic Product Design Process*, Proceedings, 34<sup>th</sup> International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO, Opatija, Croatia 2011, s. 959–964.

językiem lub poinformowanie projektanta o pożądanym elementach semantycznych). Aby osiągnąć efekt końcowy, potrzeba przekształcenia elementów sztuki w konkretne rozwiązania techniczne, które stanowią procedurę technicznego wykonania projektu. Z kolei kwestie ergonomiczne dotyczą syntezy wielodyscyplinarnej wiedzy matematycznej, społecznej, biologicznej, inżynierskiej itp. w celu stworzenia komfortowych warunków do pracy i życia człowieka. Ergonomia gwarantuje, że projektowany wyrób będzie przyjazny dla klienta w kwestiach jego użytkowania. Uwzględnienie tych dwóch aspektów – ergonomicznego i estetycznego – powinno być, zdaniem Kaljuna i Dolsaka, uzupełniane poprzez specyficzną wiedzę ekspercką w formie semantycznie zorientowanych rekomendacji połączonych z bezpośrednimi instrukcjami do manipulacji geometrycznymi modelami. Stworzenie środowiska dla formuły inteligentnego doradztwa mogłoby wyglądać w taki sposób, jak zostało to zaprezentowane na rysunku 37.



**Rysunek 37.** Propozycja struktury inteligentnego systemu wsparcia projektantów  
**Źródło:** J. Kaljun, B. Dolsak, *Artificial Intelligence in Aesthetic and Ergonomic Product Design Process*, Proceedings, 34<sup>th</sup> International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO, Opatija, Croatia 2011, s. 963.



**Rysunek 38.** Wykorzystanie inteligentnego systemu wsparcia w procesach projektowych

**Źródło:** J. Kaljun, B. Dolsak, *Artificial Intelligence in Aesthetic and Ergonomic Product Design Process*, Proceedings, 34<sup>th</sup> International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO, Opatija, Croatia 2011, s. 962.

Kluczowe parametry z zakresu ergonomii i estetyki połączone z wymaganiami klienta oraz konkretnymi wskazówkami byłyby formalizowane jako dane wejściowe. Następnie generowano by współzależne ergonomiczne i estetyczne rekomendacje, pochodzące z odpowiednich teoretycznych i praktycznych baz wiedzy. Później następowałby proces harmonizowania całości rekomendacji, co dostarczałoby konkretnych rozwiązań<sup>103</sup>.

Zaprezentowane środowisko włączone zostałoby w cały proces projektowania wspomagany inteligentnym system wsparcia. Jak widać na rysunku 38, system opierałby się na przygotowanym środowisku, a także na narzędziach ergonomicznej analizy i estetycznej oceny, które docelowo pozwalałyby kształtować odpowiednie pod kątem ergonomii i estetyki produkty.

Bi wraz ze współautorami<sup>104</sup> przeprowadzili badania nad usługami projektowania wewnątrz dla osób z niepełnosprawnością oraz produktów przy wykorzystaniu AI. Zwrócili uwagę na możliwość wspomagania niepełnosprawnych w kontekście analizy i projektowania wszystkich przestrzeni mieszkalnych, tj. łazienek, sypialni, kuchni czy też pokoiów dziennych. Poprzez inteligentny monitoring zachowań, komunikatów głosowych tych osób oraz wykorzystanie inteligentnego systemu bezpieczeństwa możliwe jest kształtowanie konkretnych rozwiązań funkcjonalnych w celu wspomagania codziennego funkcjonowania ludzi z niepełnosprawnością.

Na konieczność zwrócenia uwagi na podmiotową rolę człowieka w AI powołał się Komischke<sup>105</sup>, opisując tego typu działanie jako kreowanie wartości dla użytkowników i organizacji z wykorzystaniem do tego celu możliwości AI. W ten sposób ułatwia się podgląd gromadzonych danych, a także poprawia się produktywność oraz współpracę.

Ciekawą kwestię AI poruszył Nozaki wraz ze współautorami, opisując MonoZukuri (japońską koncepcję wytwarzania) w połączeniu z PD oraz AI<sup>106</sup>. MONOZUKURI AI system jest rozwiązaniem, które ma za zadanie wykorzystywać AI w procesach PD, efektywnie gromadząc dane w chmurze do momentu opracowania produktu przy jednoczesnym zastosowaniu modeli uczenia się bazujących na tych danych. Autorzy zauważyli, że coraz częściej technologie ML oraz AI wykorzystujące duże zbiory danych generowanych z IoT przykuwają uwagę świata nauki i praktyki. Prezentowany w artykule model Fujitsu MONOZUKURI AI jest przykładem włączenia

103 Tamże, s. 963.

104 C. Bi, H. Wang, W. Cao, *Research on the Service for the Disabled in Interior Design and Product Design Based on Artificial Intelligence*, Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference on Artificial Intelligence in China, 871 LNEE Changbaishan, China 2023, s. 144–150.

105 T. Komischke, *Human-Centred Artificial Intelligence Considerations and Implementations: A Case Study from Software Product Development*, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Conference on Human-Computer Interaction, HCII, Washington, USA 2021, s. 263.

106 N. Nozaki, E. Konno, M. Sato, M. Sakairi, T. Sihuya, Y. Kanazawa, S. Georgescu, *Application of Artificial Intelligence Technology in Product Design*, „Fujitsu Scientific and Technical Journal” 2017, vol. 53(4), s. 43–51.

ML do technicznej, elastycznej platformy komputerowej (*Flexible Technical Computing Platform* – FTCP) i stworzenia jednej zintegrowanej platformy rozwojowej. Samo włączanie technologii ML do obszaru projektowania produktu wiązało się z integracją wielu różnorodnych obszarów projektowania oraz aplikacji je obsługujących. Wykorzystane ML pozwala przewidywać, co wydarzy się na podstawie nowych informacji, generując także nowe bazy danych pod kątem ich cech. Sam proces uczenia wykorzystuje dane uczące, które stanowią następnie podstawę wyodrębnienia danych liczbowych przyszłych wektorów w celu zastosowania ich jako danych zasilających model uczenia się. Ostatni etap ML polega na analizie modelu uczenia się na podstawie danych uczących (walidacja modelu) oraz kalibracji jego dokładności (rysunek 39)<sup>107</sup>, a cały model konfiguracji FTCP przedstawia rysunek 40.

Narzędzia służące projektowaniu, takie jak platforma rozwoju podzespołów elektrycznych czy też system zarządzania projektem, pozwalają gromadzić dane we współużytkowanym systemie dzielenia się wiedzą (*Know-how*). Posiada on dane projektów, wiedzę oraz ich historię operacyjną. Wyodrębnia tym samym dane do nauczania do silników modeli nauczania AI. Te z kolei tworzą rozwiązania, które trafiają do systemu wspomagania projektowania. Wcześniej są weryfikowane w celu sprawdzenia, czy spełniają nałożone na nie ograniczenia (*Design Rule Check* – DRC). W ten sposób powstaje usługa wspomagania procesów projektowych wykorzystujących AI oraz ML.

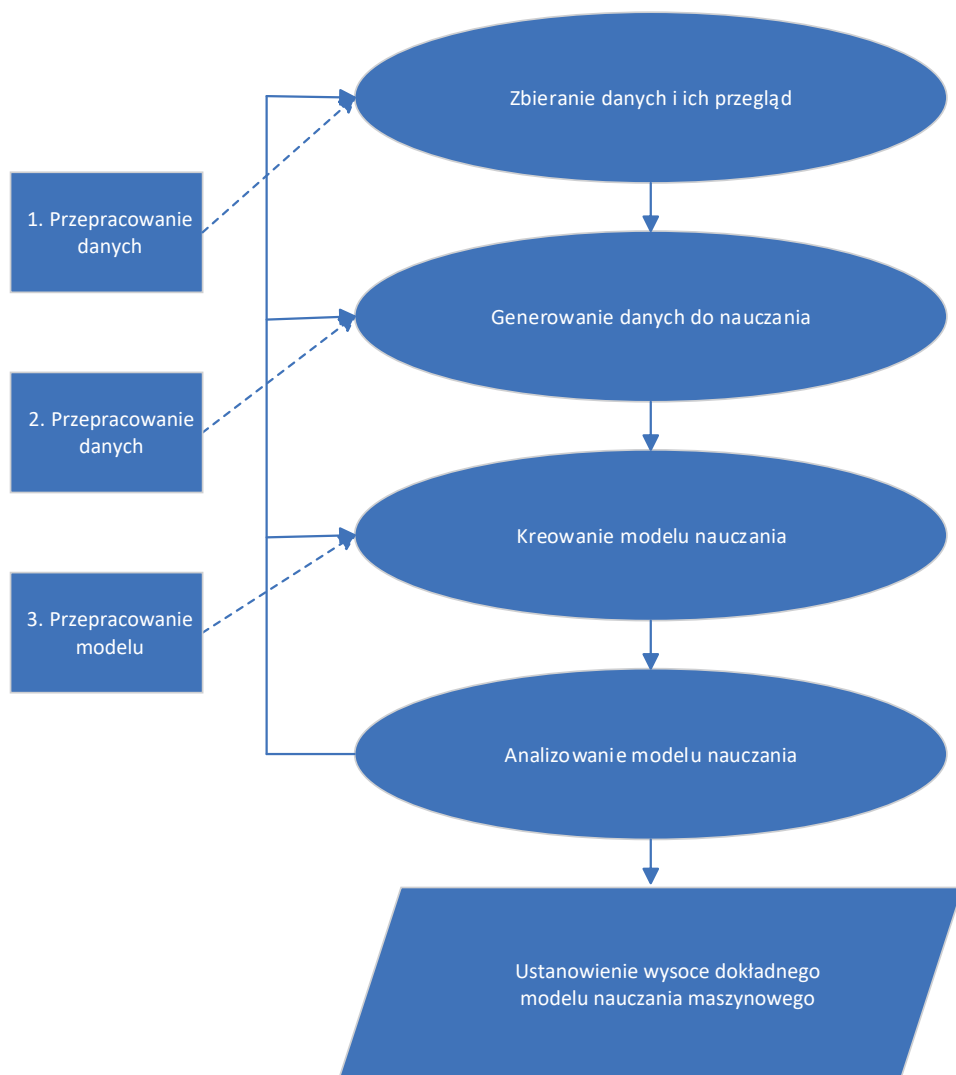
Aphirakmethawong wraz ze współautorami opisali w swoim artykule przegląd literatury dotyczącej projektowania produktów wspomagane AI dla inteligentnego wytwarzania<sup>108</sup>. Zdefiniowali oni cztery podstawowe wymiary inteligentnego wytwarzania (SM):

- elastyczność (zdolność zaspokajania zmieniających się potrzeb),
- szybkość reakcji (minimalizacja czasu modyfikacji systemu wytwórczego wynikająca ze zmian potrzeb na rynku),
- komunikacja i współpraca (odnosząca się do wszystkich funkcjonalnych obszarów współpracy),
- zintegrowanie inteligentnych systemów.

Autorzy wskazali także czynniki mające wpływ na projektowanie produktów, do których zaliczyli: funkcjonalność, wymagania klienta, estetykę, materiały, potrzeby produkcyjne, ergonomię, koszty, środowisko (rysunek 41).

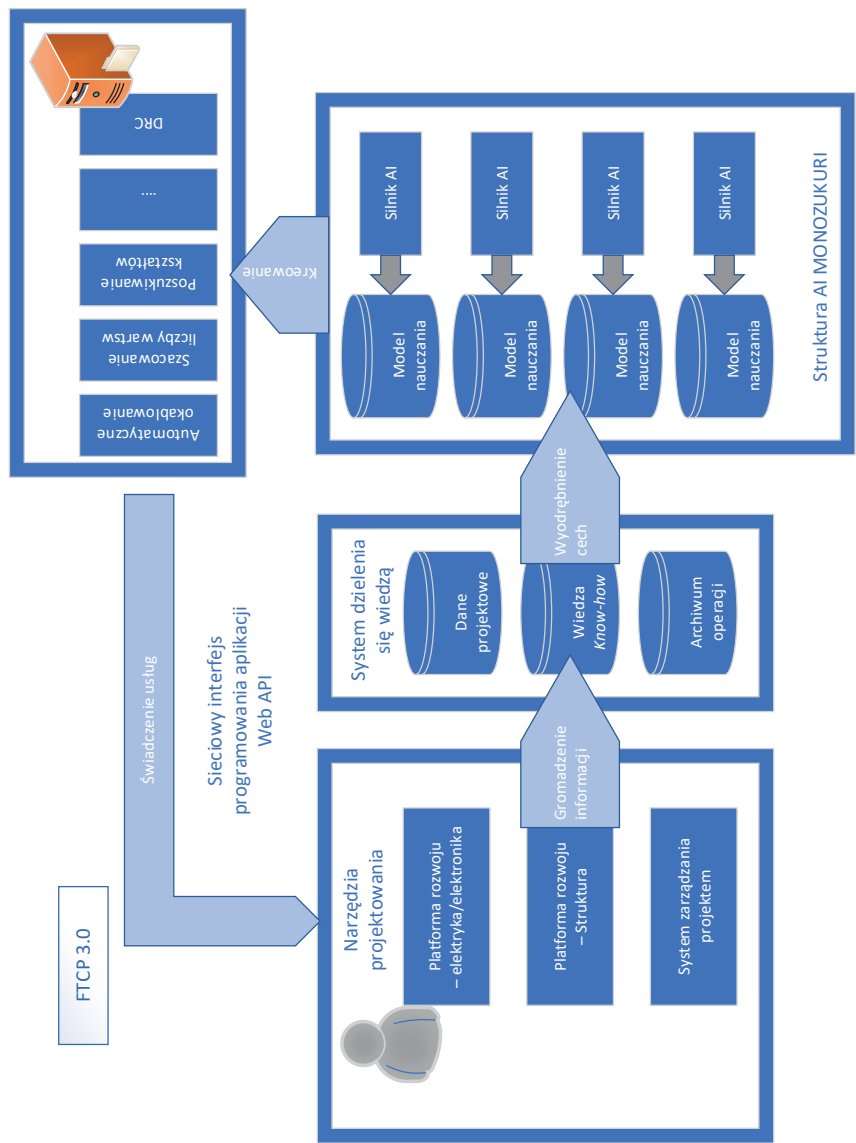
<sup>107</sup> Tamże, s. 46–47.

<sup>108</sup> J. Aphirakmethawong, E. Yang, J. Mehnert, *An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing*, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing: Smart Systems and Manufacturing, ICAC, Bristol, Great Britain 2022, s. 1–6.



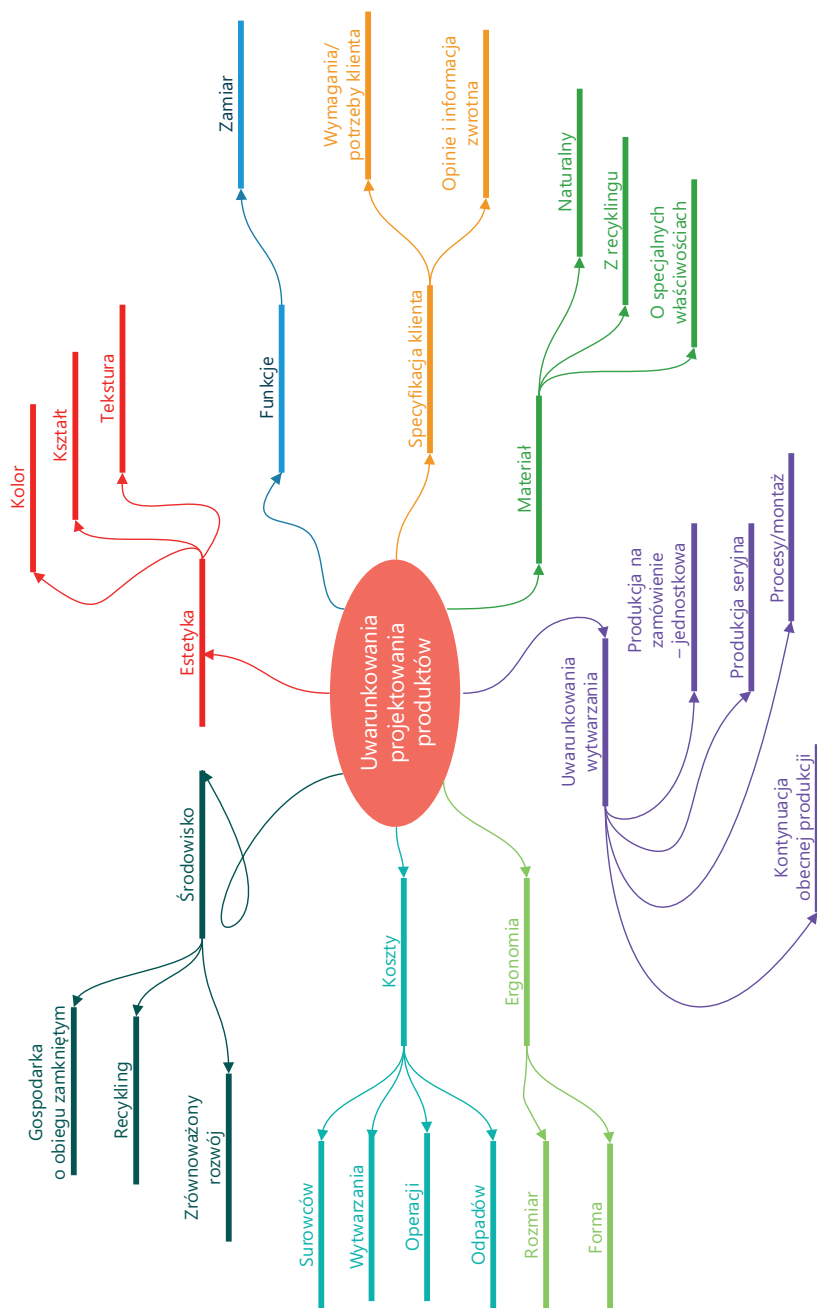
**Rysunek 39.** Etapy uczenia maszynowego

**Źródło:** N. Nozaki, E. Konno, M. Sato, M. Sakairi, T. Sihuya, Y. Kanazawa, S. Georgescu, *Application of Artificial Intelligence Technology in Product Design*, „Fujitsu Scientific and Technical Journal” 2017, vol. 53(4), s. 47.



**Rysunek 40.** Schemat funkcjonowania modelu MONOZUKURI AI w konfiguracji FTCP 3.0  
**Źródło:** N. Nozaki, E. Konno, M. Sato, M. Sakairi, T. Sihuya, Y. Kanazawa, S. Georgescu, *Application of Artificial Intelligence Technology in Product Design*, „Fujitsu Scientific and Technical Journal” 2017, vol. 53(4), s. 49.



**Rysunek 41.** Czynniki wpływające na projektowanie produktu

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie J. Aphirakmethawong, E. Yang, J. Mehnen, *An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing*, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing: Smart Systems and Manufacturing, ICAC, Bristol, Great Britain 2022, s. 2.

Na tej podstawie zbudowali model projektowania produktów wykorzystujący AI dla SM (tabela 20). W fazie koncepcyjnej projektowania produktu klienci wyrażają swoje potrzeby w postaci naturalnego języka. W przypadku AI przetwarzanie języka naturalnego (*Natural Language Processing* – NLP) jest jedną z wiodących technologii sztucznej inteligencji. Podobnie jak w odniesieniu do metody QFD przełożenie języka klienta na język konkretnych rozwiązań technicznych był zawsze dużym problemem. Algorytmy AI mogą w tej kwestii wiele pomóc, szybciej agregując, przetwarzając i analizując wypowiedziane przez klientów życzenia na temat produktu. Jedną z wykorzystywanych tu metod jest ML. Na tym etapie używane jest także DL w ramach procesów komputerowego wspomaganie CAX. AI generuje wiele modeli 3D, pozwalając ocenić inżynierom ich przydatność w projekcie. Wreszcie AI może także wykazać się pomocna w wizualizacji procesów wytwarzania projektowanego produktu oraz szacowaniu jego kosztów, co sprawia, że już w fazie koncepcyjnej pojawia się szereg zalet wdrażania AI w PD.

**Tabela 20.** Wpływ wdrożenia AI w PD dla SM

Projektowanie produktu w inteligentnej fabryce			
Fazy projektowe	Koncepcyjna	Prototypowanie	Wdrażanie
Przydatne dane	Potrzeby i wymagania klientów, doświadczenia użytkowników	Podstawowa wiedza inżynierska, doświadczenie projektantów, biblioteka 3D, istniejące wzorce i zasady projektowania	
Przykłady powiązanych technik AI	Tworzenie sieci neuronowych (np. <i>bidirectional Long Shortterm Memory</i> – BLSTM), splotowe sieci neuronowe ( <i>Convolution Neural Networks</i> – CNN)	Drzewo decyzyjne, percepcja wielowarstwowa, metody kwantyzacji wektorowej (np. <i>K-means</i> ), CNN, probabilistyczne modele graficzne (np. <i>Bayesian Networks</i> – BNs), modele głębokiego nauczania (np. <i>Generative Adversarial Networks</i> – GANs)	
Wdrażanie	Analiza potrzeb klienta, szacowanie kosztów wspomagania projektowania, dobór odpowiednich materiałów, przewidywanie i projektowanie koncepcyjne, sugestie projektowe dla projektantów		

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie J. Aphirakmethawong, E. Yang, J. Mehnen, *An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing*, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing: Smart Systems and Manufacturing, ICAC, Bristol, Great Britain 2022, s. 3.

W fazie prototypowania i opracowania części AI wspiera głównie w doborze materiałów, mogą np. analizować ich mikrostrukturę czy też cechy oraz właściwości adekwatnie do projektowanego wyrobu. Na tym etapie AI wspomaga także projektowanie samej formy produktu (kształtu, właściwości i formy), uwzględniając różnorodne części, komponenty i półwyroby. AI pomaga wyszukiwać podobne rozwiązania konstrukcyjne z określonej bazy danych znacznie szybciej, niż mógłby to

czynić projektant. W ten sposób oszczędność czasu oraz poprawa jakości projektowanych wyrobów wydają się oczywiste<sup>109</sup>.

Na kwestie interakcji w komunikacji człowiek–maszyna zwrócili uwagę Xu i współautorzy<sup>110</sup>. Dostrzegli oni konieczność poszerzenia badań nad technologiami pozwalającymi wchodzić w interakcję ludziom i AI. Przyjęli założenie, że sztuczna inteligencja stanowi swoiste „umaszynowanie” ludzkiej inteligencji, wykorzystując w ten sposób zalety maszyn (szybkość działania, powtarzalność, nieomyślność, nie-strudżoność itp.) w procesach analizowania, osądów czy też wyborów, jakie czynią ludzie. Według autorów w obszarze projektowania inteligentnych produktów można wyróżnić kilka kierunków rozwoju takich wyrobów jak inteligentne:

- produkty domowe (rozwój inteligentnego ekosystemu domowego Mijia realizowany przez firmę Xiaomi bazujący na szkielecie: platforma sprzętowa<sup>111</sup>–crowdfunding<sup>112</sup>–platforma [centrum] handlowa),
- produkty, które się nosi (inteligentne opaski, zegarki oraz inne wytwory przyczepiane do ciała lub odzieży, pozwalające również monitorować stan zdrowia użytkownika, jego samopoczucie, sen itp.; opisywali to także Liu i Huang<sup>113</sup>),
- inne urządzenia (inteligentne roboty wykazujące zdolność rozumienia i komunikacji, a dzięki AI mogące wykonywać działania, normalnie wymagające inteligencji, takie jak ocena, analiza logiczna, zrozumienie – roboty w restauracjach, centrach handlowych).

W ten sposób możliwości wynikające z AI otwierają nowe wyzwania przed projektantami, wspierając ich pracę oraz włączając do kolejnych produktów inteligentne technologie pozwalające użytkownikom wchodzić w interakcje z produktami. Generuje to konieczność innowacyjnych zmian przynajmniej w trzech obszarach:

- sposobie myślenia projektowego (sztuczna inteligencja jest w stanie rozwiązywać szereg problemów, zastępując człowieka, niemniej jednak pozostaje jeszcze kwestia emocji, integracji kulturowej czy też samego człowieczeństwa; AI wymaga od projektanta współpracy i zrozumienia sposobu jej działania i myślenia; AI bazuje na historycznym dorobku ludzkości, podsuwając pomysły, które projektanci powinni innowacyjnie i kreatywnie rozwijać),

109 Tamże, s. 3–4.

110 L. Xu, S. Qin, P. Wang, J. Gao, *Research Review on Artificial Intelligence Technology to Provide Design of Man-Machine Interaction in Industry and Product Design*, Proceedings 19<sup>th</sup> International Conference Electronic Business, Newcastle Upon Tyne, Great Britain 2019, s. 403–410.

111 Sama platforma sprzętowa bazuje na chmurze, w której funkcjonują telefony o aplikacji Xiaomi. Obsługują one inteligentne zegarki, opaski oraz sprzęt Hi-Fi (wysoka wierność – *High Fidelity*), do którego zalicza się telewizory, odkurzacze, systemy oświetlenia, wagi, kamery, oczyszczacze powietrza czy też pralki; zob. B. Li, *Application of Artificial Intelligence in Electronic Product Design*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE, London, Great Britain 2021, s. 241–244.

112 Finansowanie społecznościowe realizowane głównie poprzez aplikacje internetowe.

113 W. Liu, H. Bo Huang, *Application of Artificial Intelligence Technology in Wearable Product Design*, Proceedings, International Conference on Innovation Design and Digital Technology, ICIDDT, Zhenjing, China 2020, s. 194–197.

- wykorzystywanych metodach projektowych (technologie I 4.0 oraz technologia AI mogą wspomagać lub nawet zastąpić projektantów; na chwilę obecną ma ona znaczny wpływ na projektowane wyroby, choć nie zmieniła jeszcze pracy samych projektantów; AI może uzyskać i porównać wyniki badań podobnego projektu z przeszłości, co pozwala lepiej przygotować fazę koncepcyjną w procesie PD; umożliwia tworzenie wirtualnych rozwiązań i porównywanie ich w wirtualnym środowisku, eliminując tym samym występujące w klasycznym procesie PD błędy i zakłócenia; AI może także wspomóc proces testowania funkcji produktu już na etapie projektowania, a ponadto daje możliwość stałego aktualizowania danych i wymagań dotyczących projektu produktu w sposób iteracyjny),
- wymaganiach i celach projektowania (wykorzystanie AI przyczynia się także do większej podatności samego projektu na procesy wytwórcze, zasady i reguły wynikające z koncepcji DfX; AI daje możliwość wysokiej personalizacji projektowanych wyrobów, wspomagając tym pracę projektantów)<sup>114</sup>.

Możliwości wykorzystania AI w procesie projektowania wyrobów są zatem na chwilę obecną nie do końca zbadane. Z pewnością połączenie AI z inteligentnymi produktami (SP) daje możliwość śledzenia szeregu danych o produkcie, użytkowniku oraz różnych zachodzących interakcjach. Wydaje się, że modeli wspomagania procesów PD sztuczną inteligencją pojawi się wkrótce zdecydowanie więcej.

W zaprezentowanych dotychczas materiałach odnoszących się do kwestii AI w PD można zauważyć, że kontekst projektowania koncentruje się na produktach i ich użytkownikach. Wan zwraca uwagę, że równie ciekawym rozwiązaniem może być połączenie AI z analityką biznesową (*Business Intelligence* – BI)<sup>115</sup>. Połączenie tych dwóch zagadnień umożliwia podejmowanie przedsiębiorstwom decyzji biznesowych, czyniąc je jeszcze bardziej konkurencyjnymi. O ile bowiem BI pozwala gromadzić niezbędne dane dotyczące różnych funkcjonalnych sfer zarządzania, o tyle AI umożliwia ich połączenie we właściwy sposób, dając możliwość wykorzystania doświadczenia biznesowego oraz zakumulowanej wiedzy przez członków organizacji.

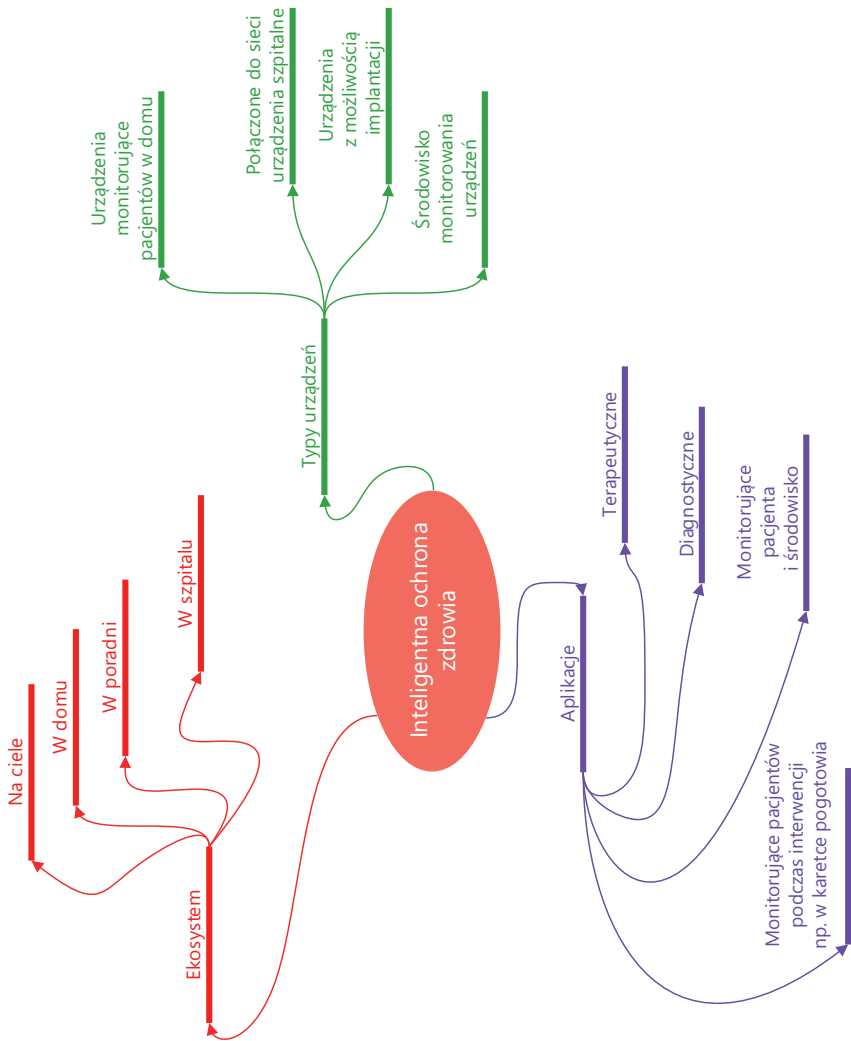
Dokonując przeglądu literatury, nie sposób zauważyć publikacji z branży medycznej odnoszących się do kwestii PD w kontekście AI. Hernandez-Jaimes wraz ze współautorami zaprezentowała koncepcję inteligentnej służby zdrowia (*Smart Healthcare* – SH), która podzielona została na trzy kluczowe obszary:

- ekosystem (dom, szpital, poradnia oraz ciało człowieka),
- aplikacje (diagnostyka, terapia, logistyka oraz monitorowanie),
- urządzenia (monitorujące pacjenta, połączone z placówką służby zdrowia, monitorujące środowisko, w którym przebywa człowiek oraz inteligentne implanty) (rysunek 42)<sup>116</sup>.

114 L. Xu, S. Qin, P. Wang, J. Gao, *Research Review on Artificial Intelligence...*, s. 406–408.

115 X. Wan, *Research on Business Data Management System of Cultural and Creative Product Design and Development based on Artificial Intelligence Algorithm*, Proceedings – 2022 International Conference on Information System, Computing and Educational Technology, ICISCET, New York, USA 2022, s. 19–22.

116 M. Hernandez-Jaimes, A. Martinez-Cruz, K. Ramírez-Gutiérrez, C. Feregrino-Urbe, *Artificial Intelligence for IoMT Security: A Review of Intrusion Detection Systems, Attacks, Datasets and Cloud-Fog-Edge Architectures*, „Internet of Things (Netherlands)” 2023, vol. 23, s. 2–3.



**Rysunek 42.** Przegląd rozwiązań SH  
**Źródło:** opracowanie własne na podstawie: M. Hernandez-Jaimes, A. Martinez-Cruz, K. Ramirez-Gutiérrez, C. Feregrino-Urbe, *Artificial Intelligence for IoMT Security: A Review of Intrusion Detection Systems, Attacks, Datasets and Cloud-Fog-Edge Architectures*, „Internet of Things (Netherlands)” 2023, vol. 23, s. 2.

Technologią, która stanowi fundament funkcjonowania SH, jest IoT, zwany dalej Internetem Medycznych Rzeczy (*Internet of Medical Things* – IoMT). Według badań wspomnianych autorów 60% podmiotów medycznych działa już w obszarze IoMT, szacuje się, że ponad 300 000 urządzeń jest ze sobą połączonych, a rynek tego typu produktów wycenia się na 208 mld dolarów<sup>117</sup>. Hernandez-Jaimes wraz ze współautorami zwróciła także uwagę na kwestie AI oraz bezpieczeństwa całego systemu SH<sup>118</sup>.

Xiao prezentuje zastosowanie algorytmu sieci neuronowej w projektowaniu i rozwoju urządzeń medycznych wykorzystującym AI<sup>119</sup>. W swojej pracy wykazuje wykorzystanie AI w procesie oceny ryzyka projektowanych urządzeń medycznych, tworząc wykaz 14 zestawów ryzyka związanych m.in. z samymi lekarzami, pacjentami, relacjami pomiędzy pacjentami i lekarzami, a także badaniami naukowymi, zasobami medycznymi oraz kwestiami IT, społecznymi i ekonomicznymi. Skupia się on również na kwestiach regulacji związanych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w medycynie<sup>120</sup>.

Podobnie do zagadnień związanych z wyrobami medycznymi oraz AI odnosi się Schweitzer wraz ze współautorami<sup>121</sup>. Badacze oprócz terminu AI wykorzystują także pojęcie wirtualnego rozwoju produktów (*Virtual Product Development* – VPD), które wspólnie z AI zwiększają zdolność tworzenia innowacji dzięki lepszej znajomości rynku oraz wymagań klientów, poprawiając tym samym jakość wytworów i skracając czas dostarczania nowego produktu na rynek. Rozwój VPD ewoluował, a jego kolejne etapy przedstawia tabela 21.

Pierwszy poziom dojrzałości, czyli model produktu w kontekście geometrii, to stworzenie obrazu fizycznego produktu za pomocą rysunku lub modelu 3D. Charakteryzuje się on głównie odzwierciedleniem geometrii kształtu dla inżyniera mechaniki lub schematów połączeń dla inżyniera elektryki lub elektroniki. Ten poziom dojrzałości można określić mianem niskiego poziomu cyfryzacji produktów. Drugi etap – behawioralny model systemu – wchodzi w interakcje, a więc oddziaływania wewnętrznej i zewnętrznej warstwy produktu na otoczenie i klienta. Obrazuje on zatem model systemu oraz zachowania – średni poziom cyfryzacji produktów.

117 Tamże, s. 3.

118 Tamże, s. 7–14.

119 Y. Xiao, *Application of Neural Network Algorithm in Medical Artificial Intelligence Product Development*, „Computational and Mathematical Methods in Medicine” 2022, vol. 2022.

120 Tamże, s. 7, 10.

121 G. Schweitzer, M. Bitzer, M. Vielhaber, *Artificial Intelligence in Engineering: Evolution of Virtual Product Development in The Context of Medical Device Industry*, Proceedings, 31<sup>st</sup> CIRP Design Conference, Twente, Netherlands 2021.

**Tabela 21.** Ewolucja procesu VPD w kierunku cyfrowej inżynierii

Poziom cyfryzacji	Modelowanie z punktu widzenia produktu	Metody i procesy inżynieryjne	Koncepcje IT, narzędzia i technologie	Poziomy cyfryzacji klientów, inżynierii oraz przedsiębiorstw
<b>Niski</b>	„Geometryczne” modele produktów	Inżynieria obiektów/ sieci, EO/EN <i>Engineering Objects/ Networks</i>	Zarządzanie cyklem życia produktu PLM	Analogowi klienci, inżynieria, przedsiębiorstwa
<b>Średni</b>	Systemowe modele „zachowań”	Inżynieria systemów bazująca na modelach ( <i>Model Based Systems Engineering</i> – MBSE)	Systemy zarządzania cyklem życia produktu ( <i>System Lifecycle Management</i> – SLM)	Analogowo-cyfrowi klienci, inżynieria, przedsiębiorstwa
<b>Wysoki</b>	Semantyczne sieci „znaczeń”  Modele usług	Inżynieria linii produktowych ( <i>Produkt Line Engineering</i> – PLE), usługa inżynierii cyklu życia ( <i>Service Lifecycle Engineering</i> – SLE), analityka inżynieryjna ( <i>Engineering Intelligence</i> – EI)	Bliźniaki cyfrowe – DT, semantyczne i cyfrowe repozytorium inżynieryjne ( <i>Semantic Product/ Process Information &amp; Digitized Engineering Repository</i> – SP <sup>2</sup> IDER)	Cyfrowi klienci, inżynieria, przedsiębiorstwa

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie: M. Bitzer, M. Eigner, K.-G. Faißt, C. Muggeo, T. Eickhoff, *Framework of the Evolution in Virtual Product Modelling and Model Management towards Digitized Engineering*, Proceedings, 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17), Vancouver, Canada 2017.

Etap trzeci – semantyczna sieć rozumienia – wiąże się z możliwością monitorowania, analizowania, interpretowania oraz przewidywania produktu oraz jego interakcji ze środowiskiem i klientami. Tworzone są tutaj różne scenariusze, a sieci semantyczne pomagają zobrazować produkt w konkretnych sytuacjach, np. użytkowanie produktu, konserwacja, wymiana części. Jest to najwyższy model cyfryzacji produktu wykorzystujący analitykę inżynieryjną (*Engineering Intelligence* – EI) oraz bliźniaki cyfrowe (*Digital Twins* – DT<sub>w</sub>)<sup>122</sup>. To właśnie semantyczna sieć rozumienia może stanowić ciekawą podstawę wdrażania AI w służbie zdrowia<sup>123</sup>.

122 M. Bitzer, M. Eigner, K.-G. Faißt, C. Muggeo, T. Eickhoff, *Framework of the Evolution in Virtual Product Modelling and Model Management towards Digitized Engineering*, Proceedings, 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17), Vancouver, Canada 2017, s. 350.

123 G. Schweitzer, M. Bitzer, M. Vielhaber, *Artificial Intelligence in Engineering: Evolution...*, s. 353.



Dość ciekawą przyszłość AI w kontekście PD zaprezentował Karakoylu wraz ze współautorami<sup>124</sup>. W ramach przeprowadzonych badań przepytali oni 101 uczestników pokolenia Z<sup>125</sup> o trzy typy osobistych asystentów wykorzystujących technologię AI, tj.:

- Google Assistant (na rynku od 2016 roku, jako rozwinięcie funkcji „Google now”, integrujący i kontrolujący inteligentne urządzenia domowe),
- Amazon Alexa (inteligentny asystent głosowy, integrujący inteligentne rozwiązania Amazon i udzielający odpowiedzi na zadawane pytania),
- Siri (Apple) (asystent reagujący na głos, pozwalający wejść w interakcję z urządzeniami firmy Apple).

Wyniki badań wykazały, że najczęstszymi użytkownikami tego typu asystentów są ludzie urodzeni w latach 2007–2008, znający głównie asystentów Google i Siri. Alexa wykazywana była przez najmniejszą liczbę badanych osób. Autorzy zwrócili jednak uwagę, że przyszłością tego typu urządzeń będą roboty (wirtualni asystenci), które poprzez swój ruch będą mogły wspomagać człowieka w jego codziennych zadaniach. Potwierdziła to firma Amazon, wprowadzając na rynek w 2017 roku mierzącego zaledwie 50 cm robota o nazwie Lynx. Posiada on tryb nadzoru poprzez zainstalowane w nim kamery i mikrofony, wykorzystując je do nagrywania krótkich filmów na temat otaczającej go przestrzeni i wysyłając je użytkownikowi.

Karakoylu i współautorzy opisali także swoją wersję robota pomagającego wstać o odpowiedniej porze i przygotować użytkownika do zadań, które go tego dnia czekają. Opisywany asystent umożliwiałby także:

- wsparcie użytkownika w informacji dotyczące jego posiłków, diety itp., rekomendując tym samym zdrowy tryb życia,
- wsparcie podczas użytkowania samochodu w wersji hologramowej, informując o trasie lub dostarczając innych informacji, których użytkownik właśnie potrzebuje,
- wsparcie informacją w dowolnym momencie dnia poprzez hologram pojawiający się na inteligentnym zegarku lub też opasce<sup>126</sup>.

Jak widać, możliwości wykorzystania AI w projektowaniu, a także w projektowanych produktach otwierają szereg nowych perspektyw, które jeszcze niedawno były sferą literatury *science fiction*. Wirtualni asystenci stają się zatem tylko jednymi z przedstawicieli przyszłości AI w produktach.

Zaprezentowany przegląd opracowań dotyczących wykorzystania AI w procesach PD wykazuje się sporym brakiem uporządkowania tematycznego. Autorzy prezentują w nim konkretne rozwiązania produktowe, technologie algorytmów, kwestie obszarów

124 P. Karakoylu, A. Kural, S. Gulden, *The Effect of Artificial Intelligence (AI) on New Product Development (NPD): A Future Scenario*, Proceedings, 5<sup>th</sup> World Multidisciplinary Civil Engineering–Architecture–Urban Planning Symposium, WMCAUS 2020, IOP Conference Series: Materials and Engineering (960), Prague, Czech Republic 2020, s. 1–13.

125 Pokolenie Z, Zoomerzy, *Post-Millennials – ludzie urodzeni pomiędzy 1995 a 2012 rokiem*, [https://www.ey.com/pl\\_pl/workforce/pokolenie-z-co-to-jest](https://www.ey.com/pl_pl/workforce/pokolenie-z-co-to-jest) [dostęp: 21.09.2023].

126 P. Karakoylu, A. Kural, S. Gulden, *The Effect of Artificial Intelligence (AI)...*, s. 4–8.

wykorzystania, a to udowadnia, że badania nad AI w procesach PD są dopiero w początkowej fazie. Wynika to ze stopnia i kierunku rozwoju samej AI, która w roku pisania książki stanowi dopiero pole do dyskusji dotyczącej aspektów humanistycznych, społecznych, etycznych oraz ekonomicznych. Powstaje jeszcze jedno zasadne pytanie o konkurencyjność samego człowieka z AI. Czy o takiej konkurencyjności powinno się w ogóle mówić? Z racji, że opisywana tematyka jest dość młoda, pytania te z pewnością uzyskają w niedługim czasie odpowiedź, a możliwości wykorzystania AI w procesie PD wydają się na chwilę obecną ograniczone tylko ludzkim umysłem.

## Rozdział 5

# Projektowanie wspomagające doskonałość 4.0

Prezentując koncepcję projektowania wspomagającego doskonałość 4.0, należy w pierwszej kolejności zauważyć, że powinna ona uwzględniać wiele warstw i aspektów. Potrzeby środowiskowe, społeczne oraz kierunki zmian technologicznych, które przyczyniają się do kreowania inteligentnych produktów w inteligentnym przemyśle, to najważniejsze konteksty koncepcji DfX 4.0.

W dotychczasowym podejściu do modeli biznesowych, kreowanym przez pierwsze trzy rewolucje przemysłowe, funkcjonowanie przedsiębiorstw opierało się na optymalizacji trzech podstawowych parametrów: kosztu, czasu i jakości. Koszt wiązał się z pozyskaniem surowców, materiałów, półproduktów, komponentów itp. po minimalnej cenie przy zachowaniu właściwego poziomu ich jakości. Łączył się on także z minimalizacją nakładów finansowych na infrastrukturę przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości jej działania. Koszt pociągał wreszcie za sobą ograniczenie wydatków na pracowników przy zapewnieniu ich zaangażowania w procesy pozwalające organizacji realizować jej cele rynkowe.

Kryterium czasu także zawsze podlegało minimalizacji, co pozwala podnosić wydajność i efektywność przedsiębiorstw. Cały dorobek pierwszych trzech rewolucji przemysłowych opierał się na zwiększaniu szybkości i skuteczności procesów: mechanizacja, zastąpienie pracy ludzkiej lub zwierząt przez maszyny, organizacja, linia montażowa Forda czy wreszcie komputeryzacja i automatyzacja, czyli stopniowe eliminowanie ludzi z czynności i zadań, które mogą przejąć maszyny. Czwarta rewolucja przemysłowa wraz z jej technologiami wyposażała przemysł w kolejne narzędzia pozwalające optymalizować kryterium czasu (oraz kosztu i jakości), wymaga to jednak wyboru jednej z dwóch dróg. Pierwsza, dotychczas znana, polega na stopniowym adaptowaniu poszczególnych technologii do procesów organizacyjnych; z kolei druga, znacznie bardziej skomplikowana, wiąże się tworzeniem na bazie technologii I 4.0 nowych modeli biznesowych.

Wreszcie na sam koniec pozostaje kryterium jakości, które z jakości totalnej, postulowanej przez filozofię *Total Quality Management* i opierającej się na paradygmacie pełnej satysfakcji klienta, stało się jakością sterowalną, zarządzaną w taki sposób, aby stwarzać potencjalne obszary zysków dla organizacji.

Kwestie środowiskowe i społeczne, podobnie zresztą jak jakość, okazują się dla przemysłu sprawą wtórną. Oczywiście pojawiające się koncepcje, chociażby społeczna odpowiedzialność biznesu (*Corporate Social Responsibility* – CSR), mają za zadanie pokazać „ludzką twarz” przemysłu, ale stopień zaangażowania organizacji w sprawy środowiskowe i społeczne jest dalece niewystarczający i niewspółmierny do korzyści, które osiąga biznes.

Czy koncepcja projektowania wspomagającego doskonałość 4.0 powinna zmierzać w kierunku utrwalania opisanych wyżej zjawisk, czy też powinna znaleźć złoty środek do symbiotycznego pogodzenia przemysłu, środowiska i społeczności? W prezentowanym opracowaniu to właśnie ten drugi, symbiotyczny model koncepcji DfX 4.0 zostanie opisany.

## **5.1. Logistyka odwrotna oraz łańcuchy dostaw o obiegu zamkniętym jako kluczowy element projektowania wspomagającego doskonałość 4.0**

Chcąc obrazowo pokazać problematykę DfX 4.0 połączoną z fizycznym przepływem odwrótnym używanych i zużytych produktów (*Used Products* – UP) oraz komponentów, należy przybliżyć zagadnienie logistyki odwrotnej w kontekście zamkniętej pętli łańcuchów dostaw.

Logistyka odwrotna nie jest pojęciem nowym. Pierwsze badania dotyczące tej problematyki pochodzą z 1950 roku. Należy także dodać, że stanowi pojęcie ewoluujące. Najbardziej popularną definicję logistyki odwrotnej sformułowali w 1999 roku Rogers i Tibben-Lembke. Wyjaśnili ją na bazie definicji *The Council of Logistics Management* (CLM) z 1986 roku, która opisywała logistykę jako proces planowania, wdrażania oraz kontrolowania wydajnych i efektywnych kosztowo przepływów surowców, zapasów produkcji w toku, wyrobów gotowych oraz powiązanych z nimi informacji od punktu pochodzenia do punktu konsumpcji w celu spełniania wymagań klienta. Rogers oraz Tibben-Lembke stwierdzili, że logistyka odwrotna zawiera wszystkie czynności opisane w definicji CLM, a jedyna różnica polega na odwrotnej kolejności prowadzonych działań. W ten sposób logistykę odwrotną można postrzegać jako proces planowania, wdrażania oraz kontrolowania wydajnych i efektywnych

kosztowo przepływów surowców, zapasów produkcji w toku, wyrobów gotowych oraz powiązanych z nimi informacji od punktu konsumpcji do punktu pochodzenia w celu odzyskania wartości lub właściwego ich zbycia. Mówiąc dokładniej, logistyka odwrotna jest procesem przemieszczania dóbr z ich typowych miejsc docelowej konsumpcji po to, by odzyskać wartości lub dokonać sprzedaży<sup>1</sup>.

Mówiąc o logistyce zwrotnej, bardzo często używa się pojęcia łańcucha dostaw funkcjonującego w ramach zamkniętej pętli (*Closed-loop Supply Chain* – CLSC). Amin i współautorzy zaprezentowali wybrane modele zamkniętych łańcuchów dostaw oraz różnicę pomiędzy logistyką tradycyjną (*Forward Logistics* – FL) a logistyką odwrotną (RL)<sup>2</sup>. Według wspomnianych autorów FL charakteryzuje się tym, że dostawcy przywożą produkty zaopatrzeniowe do fabryk, skąd przetworzone w wytwory gotowe poprzez procesy magazynowania i transportu w różnych punktach dystrybucji trafiają do ostatecznych odbiorców. RL odbiera używane lub zużyte produkty poprzez centra odbioru, z których trafiają one do centrów demontażu. Następnie wyselekcjonowane komponenty (materiały, części, półwyroby itp.) dostarczane są do fabryk poprzez centra odzysku lub centra recyklingu. Towary, które nie mogą być wtórnie zagospodarowane, trafiają do centrów utylizacji.

Z punktu widzenia projektowania produktów, które powinno uwzględniać gospodarkę o obiegu zamkniętym, możliwość wykorzystania odzyskanych komponentów lub materiałów z recyklingu wydaje się kluczowa.

Połączenie RL oraz gospodarki cyrkularnej (CE) w literaturze przedmiotu jest dość popularne. Biancolin wraz ze współautorami dokonali przeglądu literatury dotyczącej zagadnień RL&CE, wskazując na technologiczne wspomaganie wspomnianych działań<sup>3</sup>. Do najczęściej opisywanych w źródłach technologii wykorzystywanych w ramach cyrkularności logistyki odwrotnej (*Circularity of Reverse Logistics* – CRL) zaliczono:

- Internet Rzeczy (IoT),
- identyfikację towarową drogą radiową (RFID),
- *blockchain* (BLC),
- sztuczną inteligencję (AI),
- uczenie maszynowe (ML).

W omawianym opracowaniu wskazano także podstawowe ograniczenia CRL, do których zaliczono:

- specyfikę produktów oraz charakterystykę procesów produkcyjnych,
- standardy i regulacje prawne,

1 S. Rogers, R. Tibben-Lembke, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reno 1998, s. 2.

2 S. Amin, G. Zhang, M. Eldali, *A Review of Closed-loop Supply Chain Models*, „Journal of Data, Information and Management, Springer Nature Switzerland AG” 2020, vol. 2, s. 279–307.

3 M. Biancolin, L. Capoani, L. Rotaris, *Reverse Logistics and Circular Economy: A Literature Review*, „European Transport” 2023, Issue 94(7).

- konieczność ponoszenia dużych nakładów inwestycyjnych na nowe technologie,
- brak świadomości i zaangażowania zarządzania i klientów,
- niepewność odwrotnych przepływów<sup>4</sup>.

W literaturze przedmiotu coraz częściej można znaleźć sporo odwołań do technologicznych aspektów RL oraz gospodarki cyrkularnej w kontekście I 4.0. Khan i współautorzy na podstawie badań literaturowych zdefiniowali pięć kolejnych kroków zarządczych wdrażania technologii I 4.0 w ramach CRL oraz pięć poziomów technologicznych obrazujących dojrzałość technologiczną wykorzystania konkretnych technologii I 4.0 w CRL<sup>5</sup>.

Jeśli chodzi o etapy zarządcze, to w pierwszym kroku należy pamiętać, aby tworząc model biznesowy, który jest zorientowany na gospodarkę o obiegu zamkniętym, uwzględnić jego zgodność z przepisami rządowymi, ramami prawnymi oraz postępem technologicznym. Następnie należy zwrócić uwagę na kwestie ochrony danych i informacji. Powinno się w tym miejscu położyć nacisk na śledzenie informacji oraz zachowanie środków bezpieczeństwa podczas dzielenia się informacjami. Kolejny poziom zwraca uwagę na konieczność uwzględnienia wielostronnej współpracy przy symulacyjnym przejściu do CE wykorzystującym innowacje I 4.0. Następny etap wymaga zaangażowania najwyższego kierownictwa w edukowanie i uświadamianie na temat CE oraz podkreślanie jej znaczenia dla polityki i misji przedsiębiorstwa. Ostatni poziom wiąże się z szerszym udzielaniem się przedsiębiorstwa w zakresie dbałości o otaczający go ekosystem poprzez szeroką współpracę nie tylko ze strona rządową, ale także innymi branżami przemysłowymi.

Wspomniani autorzy zaprezentowali też poziomy zaawansowania technologicznego rozwiązań I 4.0. W najniższym poziomie – pierwszym – przedsiębiorstwa wykorzystują IoT oraz CC. Ta ostatnia technologia pozwala zbierać dane od wielu urządzeń jednocześnie, a IoT umożliwia komunikowanie się tych urządzeń między sobą w celu gromadzenia danych. Poziom drugi wykorzystuje kotwice kryptograficzne (CA) jako narzędzie odporne na manipulacje związane z zakłócaniem lub fałszowaniem informacji płynących od produktów lub ich komponentów. Wspomagane jest to technologią gromadzenia danych BLC, która uzupełnia narzędzia cyberbezpieczeństwa (CS). BLC pozwala wielu użytkownikom na dostęp i kontrolowanie danych z konkretnego źródła. Wspomniane technologie wspomagane są technologią radiowej identyfikacji RFID, która wraz z IoT umożliwia dostęp do danych wszystkim zainteresowanym. Opisane narzędzia warunkują inteligentnie zarządzanie informacją w dużych zbiorach danych (BD). Trzeci poziom stwarza możliwość zawierania inteligentnych kontraktów, bazujących na technologii BLC, a rozszerzona rzeczywistość pozwala na odbiór większej liczby bodźców z istniejącej rzeczywistości. CC wspomaga przedsiębiorstwa zaangażowane w CRL

4 Tamże, s. 6.

5 A. Khan, W. Laalaoui, F. Hokal, M. Tareq, L. Ahmad, *Connecting Reverse Logistics with Circular Economy in the Context of Industry 4.0*, „Kybernetes” 2023, vol. 52(12), s. 6298–6308.

w otrzymywanie informacji w czasie rzeczywistym, co poprawia transparentność łańcuchów dostaw. Poziom czwarty bazuje już na sztucznej inteligencji (AI) wspomaganej widzeniem maszynowym. Ważnym elementem jest tu także edukacja realizowana w formule e-learningu. Ostatni, piąty poziom to kompleksowe platformy cyfrowe pozwalające łączyć przemysł, agencje rządowe, jednostki naukowe oraz konsumentów w celu dzielenia się wiedzą oraz zasobami.

Problem dzielenia się wiedzą w łańcuchach dostaw o obiegu zamkniętym (CLSC) poruszyli także Rasool i współautorzy<sup>6</sup>, wskazując na siedem podstawowych konstruktorów teoretycznych w zakresie RL, do których zaliczyli:

- kreowanie poglądów oparte na wiedzy (*Knowledge-based view* – KBV) – wiedza określana jest jako najcenniejszy zasób przedsiębiorstwa, bazuje na doświadczeniu, umiejętnościach i zdolnościach pracowników,
- zarządzanie wiedzą (KM) – zachęcanie pracowników do uczenia się, co poprawia skuteczność i efektywność organizacji,
- zrównoważony rozwój (SD) – wiedza przyczynia się do promowania działań zmierzających do realizacji celów zrównoważonego rozwoju,
- łańcuchy dostaw i zrównoważony rozwój (SC&SD) – CLSC – zmniejszanie wykorzystania materiałów pierwotnych poprzez przywrócenie komponentów do ponownego użycia lub zmiany jego przeznaczenia, co tworzy zamkniętą pętlę materiałów i komponentów,
- logistykę odwrotną (RL) – jako kluczowy element zielonych łańcuchów dostaw zmierza do ponownego wykorzystania komponentów w produktach, wspomagając tym samym efekt zmniejszania powstających odpadów,
- technologie cyfrowe (DT) – cyfrowe łańcuchy dostaw (*Digital Supply Chain* – DSC) – łańcuchy dostaw bazujące na technologiach cyfrowych (oprogramowaniu, sprzęcie oraz połączeniach sieciowych), umożliwiające globalną realizację procesów,
- współpracę – przedsiębiorstwa na globalnym rynku muszą wspierać się współpracą oraz dzieleniem.

Należy w tym miejscu zauważyć, że zaprezentowany podział może stanowić ciekawy punkt odniesienia wspomagający stworzenie koncepcji DfX 4.0. W zaprezentowanych konstruktorach teoretycznych wyraźny nacisk położony jest na kwestie KBV, KM, SD oraz technologie cyfrowe, które są także kluczowymi zagadnieniami pojawiającymi się w literaturze przedmiotu odnoszącej się do problematyki DfX. Uwzględnienie konieczności zamknięcia łańcuchów dostaw w celu realizacji zadań CE oraz osiągnięcia założeń SD w projektowaniu wyrobów (PD) wydaje się jednym z podstawowych założeń, które powinny kształtować koncepcję DfX 4.0.

6 F. Rasool, M. Greco, G. Morales-Alfonso, R. Carrasco-Gallego, *What Is Next? The Effect of Reverse Logistics Adoption on Digitalization and Inter-organizational Collaboration*, „International Journal of Physical Distribution and Logistics Management” 2023, vol. 53(5–6), s. 565–568.



Zrozumienie założeń CRL oraz CLSC przez projektantów zmienia dotychczasowy sposób ich myślenia nad procesem PD. Projektowanie w warunkach ograniczonych zasobów (*Design in Constraints* – DiC) wymuszać będzie na organizacjach systemów wspomagających pozyskanie zasobów w inny niż tradycyjny sposób. Ich dostępność jest bowiem konieczna dla pracy projektantów, a więc zarządzanie cyklem życia produktu powinno mieć również charakter obiegu zamkniętego. Stwarza to wiele wyzwań, które można postawić przed przedsiębiorstwem. W celu lepszego zobrazowania tego zjawiska posłużono się prostym przykładem dotyczącym sprzętu AGD.

Na europejskim rynku AGD wśród największych producentów można znaleźć przedsiębiorstwa pochodzące z:

- Europy (np. B/S/H, Miele, Electrolux, Smeg i inne),
- Azji (np. Samsung, LG, Panasonic itd.),
- Ameryki Północnej (Whirlpool itd.).

Każdy z producentów oferuje na rynku europejskim konkretne produkty w danych kategoriach sprzętów AGD. Jeśli poddać analizie pod kątem CRL lub CLSC tylko jedną kategorię produktów, np. pralki, to na tej podstawie można zidentyfikować wiele obszarów problematycznych stojących przed przedsiębiorstwami. Można je skategoryzować w następujących grupach:

- produktowej (architektury samych wyrobów – standaryzacji, modułowości, różnorodności komponentów),
- systemowej (budowa systemu CRL lub CLSC przez przedsiębiorstwo),
- organizacyjnej (działania projektantów uwzględniające założenia systemu CRL/CLSC),
- kooperacyjnej (realizacji przez przedsiębiorstwa wspólnych projektów wspomagających DfCE),
- konsumenckiej (zmiana postaw nabywczych klientów).

Biorąc pod uwagę **kontekst produktowy**, producent, który chciałby odebrać dany produkt z rynku, w pierwszej kolejności musiałby mieć kompletne zestawienie komponentów tego produktu (BoM) wraz ze specyfikacją techniczną. Ponieważ producenci w różnych branżach przemysłu są prawnie zobligowani do zapewnienia części zamiennych do ich wyrobów, należy więc założyć, że takie dane powinny być dostępne, o ile dany producent będzie jeszcze funkcjonować na rynku.

Zestawienie komponentów zużytych lub używanych produktów stanowiłoby bazę wiedzy dla producenta co do potencjału wykorzystania używanych lub zużytych komponentów. W tym momencie pojawia się jednak szereg problemów związanych z samymi komponentami, a mianowicie:

- zmienność – komponenty wykorzystywane do produkcji na przełomie lat (często miesięcy) mogły ulegać modyfikacjom na skutek ich doskonalenia, eliminacji błędów konstrukcyjnych, dywersyfikacji dostawców, kwestii ograniczonych zasobów lub, co pewnie mogło zdarzać się najczęściej, pod wpływem minimalizacji kosztów wytwarzania samych komponentów,

- kompatybilność/wymiennność – przy obecnej polityce przedsiębiorstw branży AGD najwięksi producenci ze sobą konkurują, chcąc podkreślić wyjątkowość swoich produktów; oznacza to, że można postawić hipotezę, iż istnieje duże prawdopodobieństwo kompatybilności komponentów w ramach produktów produkowanych w danym koncernie, przy względnie niskiej kompatybilności tych samych podzespołów pomiędzy produktami różnych koncernów,
- zmiany technologii funkcjonowania danego procesu sprzętu AGD, np. zmiana konstrukcji suszarek do ubrań z tradycyjnej, opartej na energochłonnych grzałkach na rzecz urządzeń bazujących na technologii pomp ciepła – zupełnie inne rozwiązania technologiczne to całkowicie różne komponenty,
- zamienniki oryginałów – występowanie w odbieranych wyrobach zamiast oryginalnych zamienników części wymienionych na nowe w fazie MoL cyklu życia produktu, które mogą nie posiadać dokładnej specyfikacji technicznej lub nie były poddawane takim samym testom jak oryginały,
- zużycie komponentów – stopień zużycia komponentów i metodyka jego oceny wynikają często z warunków użytkowania produktów w różnych warunkach, które niekoniecznie musi być zgodne z instrukcją obsługi; dodatkowo wpływ mają tutaj kwestie serwisowania wytworów oraz przeprowadzania działań związanych z przeglądami, naprawami bieżącymi czy też naprawami generalnymi, żywotnością komponentów projektowanych często według cykli pracy (żywotność ograniczana przez producenta, czyli *Original Equipment Manufacturer* – OEM), różnorodnej częstotliwości i intensywności użytkowania danego wyrobu przez klientów końcowych, co przekłada się na różny czas przejścia produktu w fazę cyklu życia EoL,
- identyfikowalność komponentów – przedsiębiorstwa produkcyjne, chcąc zachować konkurencyjność oraz *know-how* komponentu, wykorzystują rozmaite systemy identyfikacji towarowej, które mogły się zmieniać na przełomie lat lub nawet dublować,
- gromadzenie danych o komponentach – przy typie produkcji masowej lub wieloseryjnej oraz dużej różnorodności produktów konieczne są działania na dużych zbiorach danych; należy przy tym zauważyć, że problem identyfikowalności komponentów oraz dużych zbiorów danych może być rozwiązany poprzez dostępne obecnie technologie IT I 4.0, takie jak CC, BDA, CS, BLC, które stwarzają środowisko do przechowywania tak dużych zbiorów danych.

Zaprezentowane kwestie stanowią dopiero początek problemów związanych z CRL lub CLSC omawianego przykładu. Jeszcze większym wyzwaniem jest budowa samego systemu CRL/CLSC.

**Kontekst systemowy** zakłada, że system odbioru używanych lub zużytych produktów z rynku działa odwrotnie do dotychczasowego trybu przepływu materiałów, opierającego się na schemacie: zaopatrzenie–produkcja–dystrybucja–klient. Założenia tego systemu zazwyczaj bazują na przepływie klient–dystrybucja–produkcja–zaopatrzenie, ale mogą pomijać niektóre fazy logistyczne, np. dystrybucję lub samą

produkcję. W ten sposób punkt rozdziału (*Decoupling Point* – DP) mógłby zadziałać odwrotnie i zostać uznany za odwrotny punkt rozdziału (*Reverse Decoupling Point* – RDP). Dodatkowo w ramach zarówno naturalnego, jak i odwrotnego przepływu mogą pojawiać się organizacje wspomagające ten proces.

Tak jak DP w odpowiedzi na postawy klientów generuje sposoby działania przedsiębiorstwa w sferze zaopatrzenia, wytwarzania i dystrybucji przy wykorzystaniu strategii *push* lub *pull*, tak RDP może być formułą, w której do priorytetów przedsiębiorstwa co do włączania w fazy dystrybucji, produkcji lub zaopatrzenia używanych komponentów mogą kształtować budowę całego systemu.

Zasada działania RDP może opierać się podobnie jak DP na strategiach typu *push* i *pull*. Strategia *push* byłaby związana gromadzeniem komponentów odebranych z rynku w formie zapasów. Używane komponenty znajdowałby się w magazynach (bądź to zainteresowanych przedsiębiorstw, bądź to dostawców tego typu usług), a następnie byłyby zamawiane do danych faz logistycznych (zaopatrzenie, produkcja, dystrybucja) przez konkretne organizacje. Strategia typu *pull* wiązałaby się z czasowymi akcjami pozyskania używanych elementów, które byłyby zwracane przez klientów w konkretnym czasie z rynku. Mogłyby do tego służyć kampanie marketingowe lub inne działania rynkowe mające na celu nakłonienie klientów do zwrotu produktów z pożądanymi komponentami. Podobnie jak DP posiada swoje konkretne warianty działań, zależne od formy decydowania o ostatecznym wyglądzie produktu (np. produkcja na zamówienie, montaż na zamówienie itp.), tak samo w przypadku RDP tego typu reakcje są możliwe do zdefiniowania. Propozycja tego typu podziałów mogłaby wyglądać następująco:

- używany lub zużyty produkt na zamówienie,
- używany komponent na zamówienie,
- używany lub zużyty produkt na magazyn,
- używany komponent na magazyn.

Każde z rozwiązań pozwala pozyskać konkretne elementy z rynku produktów używanych lub zużytych. Kwestią różniącą jest reaktywna lub bierna postawa przedsiębiorstwa chcącego otrzymać komponenty lub wyroby gotowe.

Założenia wynikające z dotychczasowych modeli biznesowych komplikują z pewnością strukturę całego systemu CRL/CLSC, co może wynikać z następujących czynników:

- braku funkcjonujących rozwiązań systemowych CRL/CLSC (nieliczna grupa modeli lub koncepcji prezentująca celowo zaprojektowane i zorganizowane układy zarządzania używanymi i zużytymi komponentami),
- braku platform informatycznych, czyli systemu informatycznego obsługi zwrotów (np. elektronicznych platform identyfikacji używanych części zamiennych lub produktów, w tym tych zużytych),
- fizycznej (operacyjnej) obsługi zwrotów (gotowości potencjalnych operatorów systemu CRL/CLSC do świadczenia tego typu usług).

Problemy te wynikają w głównej mierze z braku podjęcia przez przemysł problematyki kompleksowego rozwiązania kwestii CRL/CLSC, czego przyczyną może być kosztowność tego typu rozwiązań.

Kwestie systemowe dotyczą także systemów informatycznych (IT) lub informatyczno-komunikacyjnych (ICT) wspomagających działanie CRL/CLSC. Włączenie do istniejących modułów systemów ERP, rozwiązań CRL/CLSC wymusiłoby stworzenie otwartego dostępu do danych o konkretnych produktach. Problem pozostaje możliwy do rozwiązania w obszarze danej organizacji (korporacji), o ile system identyfikacji towarowej posiada opis niezbędnych atrybutów, które mogą być wykorzystane w obszarze odzyskania danych komponentów. Kwestia ta staje się nieco bardziej złożona w przypadku otwarcia systemu na inne organizacje wykorzystujące rozwiązanie IT lub na podmioty używające systemów ERP różnych dostawców. Kompatybilność tychże systemów jest w chwili obecnej praktycznie niemożliwa, co wynika z modeli konkurencyjnych przedsiębiorstw oferujących oprogramowanie klasy ERP. Przykład platformy ułatwiającej pozyskanie używanych części został zaprezentowany wcześniej na podstawie opracowania Wallata i współautorów<sup>7</sup>.

**Kwestia organizacyjna** związana jest z zachowaniem pewnych zasad, które mogą wspomagać DfCE w różnych fazach cyklu życia wyrobu (BoL/MoL/EoL).

W fazie BoL – właściwej fazie projektowania i konstruowania wyrobu – projektanci potrzebowaliby zestawu informacji pozwalających włączać używane komponenty do nowo projektowanych lub doskonalonych wyrobów. Kwestia samej dostępności stanowiłaby tylko jeden z aspektów. Innymi byłyby kwestie ilości dostępnych komponentów, ich jakości, kosztów, stopnia zużycia itp. Wymagałoby to stworzenia nowego systemu identyfikacji towarowej pozwalającego identyfikować dane zużyte przez podzespoły. Uwzględnienie zestawienia materiałowego używanych i zużytych produktów byłoby tylko jednym z aspektów. Seryjność produkcji tych komponentów, lokalizacja producenta, kolejne udoskonalenia itp. sprawiłyby, że działalność projektantów uległaby wyraźnym ograniczeniom (DiC). Organizacja samego procesu projektowania wymagałaby zatem stworzenia nowych rozwiązań.

Innym aspektem jest proces konturowania, prototypowania oraz uruchomienia produkcji. Stabilność dostępności komponentów okazuje się tutaj kluczowa, a więc należy założyć, że braki komponentów wtórnych powinny być kompensowane nowymi materiałami lub półproduktami. W ten sposób część produktów byłaby uzbrojona w komponenty nowe, a pozostałe w używane. Na tej podstawie pojawia się problem określenia wartości danych produktów. Oczywiście mógłby on zostać rozwiązany poprzez zastosowanie wskaźnika udziału komponentów używanych<sup>8</sup> będących informacją dla klienta.

7 P. Wallat, S. Lawrenz, A. Lohrengel, *A Knowledge-based Product Design Assistance for the Advanced Circular Economy*, Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Stuttgart, Deutschland 2021.

8 Wskaźnik ten mógłby być podobny do wskaźnika wykorzystania w benzynie lub oleju napędowym biokomponentów, np. E5 lub E10. Oznacza to zawartość maksymalną biokomponentów do 5% lub 10%, a wartość używanych komponentów do 5% lub 10%.

W fazie MoL, czyli użytkowania produktów, konieczny byłby ciągły monitoring używanych wytworów, zużywania się danych komponentów oraz wymiany serwisowej części zamiennych. Jest to możliwe na skutek rozszerzającej swoje zastosowanie technologii IoT. W ramach tej fazy identyfikowalność oraz zbieranie danych są kluczowe, aby móc następnie przejść do fazy EOL – odbioru podzespołów z rynku. W tym miejscu oryginalność komponentów, znajomość, identyfikowalność i monitorowanie specyfikacji zamienników części ma fundamentalne znaczenie. Nie wszyscy bowiem klienci wykorzystują oryginalne części zamienne, co jeszcze bardziej komplikuje ten proces. W fazie MoL producent ma za zadanie monitorować produkt w celu:

- identyfikacji problemów występujących podczas użytkowania produktu oraz ich eliminacji,
- identyfikacji sposobu obsługi urządzeń przez użytkowników służącej doskonaleniu ich funkcjonalności,
- identyfikacji i rekomendacji napraw bieżących, cyklicznych, kapitalnych itp.,
- monitoringu wprowadzanych do obiegu zamienników.

W tej fazie zbierane przez producentów informacje i dane służą poprawie obecnej działalności wytwórczej przedsiębiorstwa oraz prognozowaniu dostępności komponentów wtórnych ( $S_{COM}$ ).

Faza EoL wiąże się z identyfikacją podaży używanych lub zużytych produktów oraz uruchomieniem odwrotnego przepływu  $S_{COM}$ . Sama podaż używanych lub zużytych produktów zależy od wielu zmiennych. Można do nich zaliczyć np. częstotliwość i warunki użytkowania, użytkowanie zgodnie z instrukcją czy też samych użytkowników, ich wiek, dojrzałość itp. Jest więc ona trudna do oszacowania i wymagałaby prowadzenia szeregu badań konsumenckich przez przedsiębiorstwa. Nie możemy jednak stwierdzić, że takie dane są już zbierane, a organizacje dysponują taką wiedzą. Szacowanie podaży części używanych bez dodatkowych założeń biznesowych wydaje się rzeczą trudną. Niemniej należy zauważyć, że w dobie rosnącego wykorzystywania technologii I 4.0, np., IoT, CC, BDA, AI, wspomniane działania mogą być wspomagane nowoczesnymi technologiami.

Istotnym narzędziem wspomagającym działalność przedsiębiorstw może być zarządzanie czasem eksploatacji produktów przez klienta. Przyjęcie jednak odgórnego założenia dotyczącego limitu czasu eksploatacji produktów jest w stanie wymusić zmianę dotychczasowych modeli ekonomicznych. Powstaje tutaj bowiem kilka zasadnych pytań, np.:

- Czy klienci będą skłonni zaakceptować określoną z góry długość życia produktu?<sup>9</sup>
- Jakie formy motywacji będą konieczne, aby klienci zaakceptowali nowe zasady (marketingowe, prawne itp.)?
- Czy etap wycofania produktów z rynku będzie przymusowy, czy też obligatoryjny?

9 Dzieje się już tak obecnie bez zgody konsumentów, kiedy to producenci np. kończą wsparcie techniczne konkretnych produktów lub ich oprogramowania.

Jak widać, każda z faz cyklu życia produktu niesie za sobą konkretne wyzwania w kontekście RL oraz CLSC. Ostatni z omawianych czynników to kontekst kooperacyjny.

Kooperacyjne współdziałanie przedsiębiorstw w kierunku optymalizacji paradygmatu C/T/Q jest rzeczą powszechną na rynku. Wykorzystywanie wspólnych platform, konstrukcji, modułów, podzespołów czy konkretnych części minimalizuje koszty ich wytwarzania, co daje organizacjom wymierny efekt. Drugim skutkiem takiej współpracy jest dzielenie się wiedzą (*know-how*), co determinuje rozwój kooperujących ze sobą przedsiębiorstw.

Kwestia RL/CLSC nie jest już tak oczywistą sprawą. O ile w przypadku optymalizacji paradygmatu C/T/Q przedsiębiorstwa mogą liczyć na konkretne zyski, o tyle w sytuacji zarządzania całym systemem przepływu odwrotnego pojawia się gama kosztów generująca niewielką korzyść biznesową (za to istotną korzyść środowiskową). Synergia działania przedsiębiorstw w tej materii z pewnością może obniżyć koszty funkcjonowania takiego systemu, nie gwarantując przy tym zysków. Jest ona w stanie przynieść także następujące korzyści:

- dzielenia się komponentami wtórnymi ( $S_{COM}$ ) w ramach ich byłej funkcjonalności, ale także w obszarze nowych, możliwych zastosowań,
- współtworzenia i współdziału w różnorodnych systemach RL/CLSC, które nie zawsze muszą wykazywać się kompatybilnością (podobnie jak systemy ERP),
- realizacji wspólnych projektów z obszarów PD bazujących na zużytych i używanych produktach, a w konsekwencji także na  $S_{COM}$ ,
- identyfikacji kryteriów doboru dostawców usług koniecznych do zapewnienia ciągłości działania systemów RL/CLSC,
- dzielenia się wiedzą (realizacja wspólnych projektów pozwala identyfikować: możliwe obszary zastosowania i wykorzystania  $S_{COM}$ , narzędzia i metody, konkretne rozwiązania oraz koncepcje realizacji RL/CLSC).

Z drugiej strony istnieje jednak znaczna liczba barier utrudniających takie działania. Można do nich zaliczyć:

- kosztochłonność – realizacja założeń RL/CLSC jest kosztochłonna, co nie przekłada się ani na zyskowność przedsiębiorstw, ani na konkurencyjność cenową oferowanych na rynku produktów; wysokie koszty funkcjonowania systemów RL/CLSC nie mogą być kompensowane podwyżkami cen towarów, ponieważ straciłyby one swoją atrakcyjność w oczach nabywców; odwołać się tutaj można jedynie do świadomości klientów co do realizacji konkretnych wyborów konsumenckich,
- konkurencyjność – przy obecnej polityce przedsiębiorstw najwięksi producenci konkurują ze sobą, chcąc podkreślić wyjątkowość swoich produktów; oznacza to, że może istnieć duże prawdopodobieństwo kompatybilności komponentów w ramach produktów produkowanych w danym koncernie (ekonomia skali), przy względnie niskiej kompatybilności pomiędzy produktami różnych koncernów,
- transparentność – przekazywanie informacji przedsiębiorstwa do jego bliższego i dalszego otoczenia jest realizowane na ogół w sposób ograniczony; część



informacji dostarczanych kooperantom wynika z kwestii prawnych lub też warunków umów; istnieje jednak duża część informacji, którą przedsiębiorcy niechętnie się dzielą w skali globalnej, ale w jeszcze większym stopniu,

- konserwatyzm biznesowy – przyjęcie paradygmatu C/T/Q jako kluczowego elementu realizacji strategii firm powoduje zamknięcie się ich na kwestie optymalizacji innych parametrów, w tym parametru związanego z realizacją celów zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki cyrkularnej; oznacza to, że przedsiębiorstwa są bardziej skłonne do inwestowania w rozwiązania, które przynoszą zysk aniżeli w altruistyczne podejścia w kwestiach społecznych czy też środowiskowych; potrzeba tu często nowych, innych modeli biznesowych, które zrywają z dotychczasowym paradygmatem C/T/Q.

Odrębną barierę utrudniającą funkcjonowanie RL/CLSC, a co za tym idzie – DfX 4.0 mogą stanowić dotychczasowe przyzwyczajenia konsumentów:

- przywiązanie do konkretnej marki produktów,
- skłonność do podążania za modą,
- skłonność do kupowania tylko nowych, nieużywanych przedmiotów,
- brak zaufania do projektów wykorzystujących substytucyjne komponenty,
- kierowanie się paradygmatem cena/czas/jakość (P/T/Q) podczas dokonywania wyborów konsumenckich,
- nadmierna podatność klientów na dziania marketingowe (promocje, reklamy itp.),
- inne dotychczasowe nawyki utrudniające redefinicję dotychczasowego projektowania wyrobów.

Zmiana mentalności i sposobu myślenia konsumentów nie jest łatwa. Z przeprowadzonych przez autora krótkich badań pilotażowych na przypadkowej próbie 243 uczniów szkół licealnych, studentów studiów pierwszego i drugiego stopnia oraz studentów studiów podyplomowych wynika, że zdecydowana większość tych osób uważa, że zna cele zrównoważonego rozwoju, ale zaledwie ok. 3% respondentów potrafi wymienić przynajmniej jeden z nich<sup>10</sup>. Oznacza to, że w przebadanej grupie respondentów świadomość nabywcza uwzględniająca kwestie środowiskowe często może być kształtowana pod wpływem działań *Public Realtion* organizacji, mediów społecznościowych lub innych kształtujących opinię podmiotów.

Tak jak organizacje przyzwyczajone są do konkretnego funkcjonowania w warunkach paradygmatu C/T/Q, tak samo i klienci działają w ramach paradygmatu P/T/Q. Zmiana tych przyzwyczajzeń czy też nawyków następuje wskutek przemiany świadomości konsumentów, a to powinno wynikać z ich edukacji.

Zaprezentowane przemyślenia pozwalają zwrócić uwagę na wieloaspektową grupę wyzwań stojących przed pozyskiwaniem komponentów wtórnych z rynku

10 Badanie przeprowadzone na respondentach szkół licealnych i wyższych w województwie łódzkim, dobór próby przypadkowy, w badaniu dokonano analizy dwóch aspektów: Czy znasz cele zrównoważonego rozwoju? Wymień przynajmniej jeden z celów.



oraz ich ponownym wykorzystaniem w nowo projektowanych lub doskonalonych produktach. W kolejnym rozdziale zaprezentowana zostanie koncepcja projektowania wspomagającego doskonałość 4.0, bazująca na RL/CLSC.

## 5.2. Koncepcja projektowania wspomagającego doskonałość 4.0

Opisując koncepcję DfX 4.0, postanowiono sformułować pewne założenia. Powinna ona być nowoczesnym, ale zarazem świadomym projektowaniem i rozwojem produktów, zrywającym z częścią dotychczasowych paradygmatów projektowania. DfX 4.0 musi zatem uwzględniać następujące kwestie:

- środowiskową – opierającą się na celach zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym,
- społeczną – pozwalającą wykorzystywać nowe modele ekonomiczne i biznesowe,
- technologiczną – bazującą na technologiach i zasadach przemysłu 4.0 (I 4.0).

Kolejność zaprezentowanych aspektów nie jest przypadkowa i wskazuje priorytety procesu projektowania. Każda z tych kwestii w odmienny sposób będzie wpływać na proces PD, co zostanie w krótki sposób opisane w kolejnym podrozdziale.

Pierwsza z kwestii, czyli kwestia środowiskowa, to przyjęcie założenia, że produkt projektowany w ramach DfX 4.0 powinien uwzględniać założenia celów SD oraz CE. Przejście z gospodarki liniowej na gospodarkę o obiegu zamkniętym wymusza wykorzystanie 10R już na etapie projektowania produktu. Odrzucenie dotychczasowego sposobu myślenia i ponowne przemyślenie działań projektowych na rzecz zmiany przeznaczenia materiału, komponentu itp., regeneracji, odnawiania, naprawiania, ponownego użycia, redukowania stanowi kluczowy element DfX 4.0. Poddawanie produktów będących w fazie EoL recyklingowi czy też odzyskiwanie z nich energii powinno stanowić ostateczność i świadczyć o archaicznym sposobie myślenia o projektowaniu produktów. Realizacja takich założeń wspiera trzynasty cel SD – działania na rzecz klimatu – i w tym kontekście pozwala DfX realnie wpływać na środowisko.

Drugi element wiąże się ze zmianami społecznymi. Mają one różny charakter i są wynikiem odmiennych przesłanek. Zmiany zachowań konsumentów wpływają na pojawianie się nowych modeli biznesowych. Na stronie Business Model Navigator<sup>11</sup> można znaleźć ok. 60 modeli biznesowych, które krótko opisują ich koncepcję, szablon oraz mechanizmy. Znajomość chociażby podstawowych założeń takich modeli jest kluczowa z punktu widzenia pracy projektanta DfX 4.0. Świadomość istnienia rozwiązań, które być może są niepopularne, ale możliwe do zastosowania

11 <https://businessmodelnavigator.com/explore> [dostęp: 12.12.2023].

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie <https://businessmodelnavigator.com/explore> [dostęp: 12.12.2023].

- śmieci na gotówkę (*Trash to Cash*) – zużyte produkty są odbierane z rynku, a następnie sprzedawane w innych częściach świata,
- bez fanaberii (*No Frills*) – produkty wyposaża się tylko w to, co jest niezbędne do zaspokojenia podstawowej potrzeby, a oszczędności wynikające z tego typu podejścia są współdzielone z klientami,
- projektowanie przez użytkownika (*User Designed*) – użytkownik, wykorzystując narzędzia oferowane na rynku, staje się zarówno projektantem, producentem, jak i konsumentem, będąc wspieranym przez organizację realizującą taki model biznesowy,
- czujniki jako usługa (*Sensors as a Service*) – oferowane są czujniki, które potrafią zbierać różnorodne informacje z otoczenia, a analiza tych danych stanowi podstawę przychodu.

Jak widać, klasyczny układ PD może być mocno zmodyfikowany, jeśli tylko poszerzy się horyzonty pojęciowe projektantów o zmieniające się modele biznesowe.

Trzecie z wyzwań wiąże się z wykorzystaniem technologii I 4.0 oraz wdrożeniem zasad czwartej rewolucji przemysłowej. Systemy cyberfizyczne (CPS), wytwarzanie addytywne (AM), rozszerzona i wirtualna rzeczywistość (AR/VR) czy też sztuczna inteligencja (AI) stanowią technologiczny zestaw, którym świat jeszcze nie dysponował. Jeśli dodamy do tego Internet Wszystkiego (*Internet of Everything* – IoE), na który składa się Internet Rzeczy (IoT), przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT), Internet Usług (IoS), Internet Materiałów (IoM) czy też Internet Urządzeń Medycznych (IoMT), to okazuje się, że rzeczywistość przemysłowa trzeciej dekady XXI wieku jest bardzo interesująca. Koncepcja DfX 4.0 powinna uwzględniać te technologie (ale nie tylko) w służbie przedsiębiorstwa zarządzającego pracami projektowania i rozwoju produktu, a przede wszystkim przy tworzeniu produktów społecznie akceptowalnych oraz w jak największym stopniu pozytywnie wpływających na środowisko naturalne lub będących dla niego co najmniej neutralnymi.

Bazując na dokonanym przeglądzie literatury oraz biorąc pod uwagę zaprezentowane trzy konteksty, autor postanowił przedstawić podstawowe założenia koncepcji DfX 4.0, do których można zaliczyć obszary:

- środowiskowy (*Design for Circular Economy* – DfCE),
- społeczny (*Design for Society 5.0* – DfS5.0; uwzględniający nowe modele biznesowe, trendy społeczne oraz dobrostan społeczności),
- technologiczny (*Design for Industry 4.0* – DfI4.0).

Tak zaprezentowane założenia w zasadzie zmieniają dotychczasowy sposób podejmowania prac projektowych, ale także wymagają szerszych przekształceń zarówno w organizacji, jak i u konsumentów.

Zrozumienie koncepcji DfX 4.0 wymaga nowego spojrzenia na proces projektowania, które zrywa z dotychczasowymi przyzwyczajeniami projektantów, tzn.:

- zmiany dotychczas wykorzystywanej zasady minimalizacji kosztów, czasu i zysku przy zadawalającej jakości jako kluczowych wytycznych projektowania;
- pełnej dostępności komponentów – przyjęcia założenia o wyczerpaniu się wybranych zasobów (komponentów), czego skutkiem powinno być projektowanie w warunkach ograniczeń (*Design in Constraints* – DiC);
- funkcjonowania modelu liniowego gospodarki – uwzględnianie nowych, dotychczas niestosowanych modeli biznesowych;
- wykorzystania tam, gdzie jest to możliwe, technologii I 4.0 w obszarach:
  - zbierania i analizy danych o wyrobach, użytkownikach oraz o surowcach, materiałach, częściach i komponentach dostępnych na rynku, w tym na rynku EoL (sieć czujników – SN, Internet Wszystkiego – IoE, chmura obliczeniowa – CC, analityka zbiorów – BDA),
  - zabezpieczenia danych (*Blockchain* – BLC, *Cybersecurity* – CS),

- optymalizacji procesów i systemów PD w kierunku *Virtual Product Design & Development* – VPD (sztuczna inteligencja, rozszerzona i wirtualna rzeczywistość, symulacje, systemy cyberfizyczne, wytwarzanie addytywne).

Cała koncepcja DfX 4.0 powinna bazować na czterech fundamentalnych warstwach, a mianowicie:

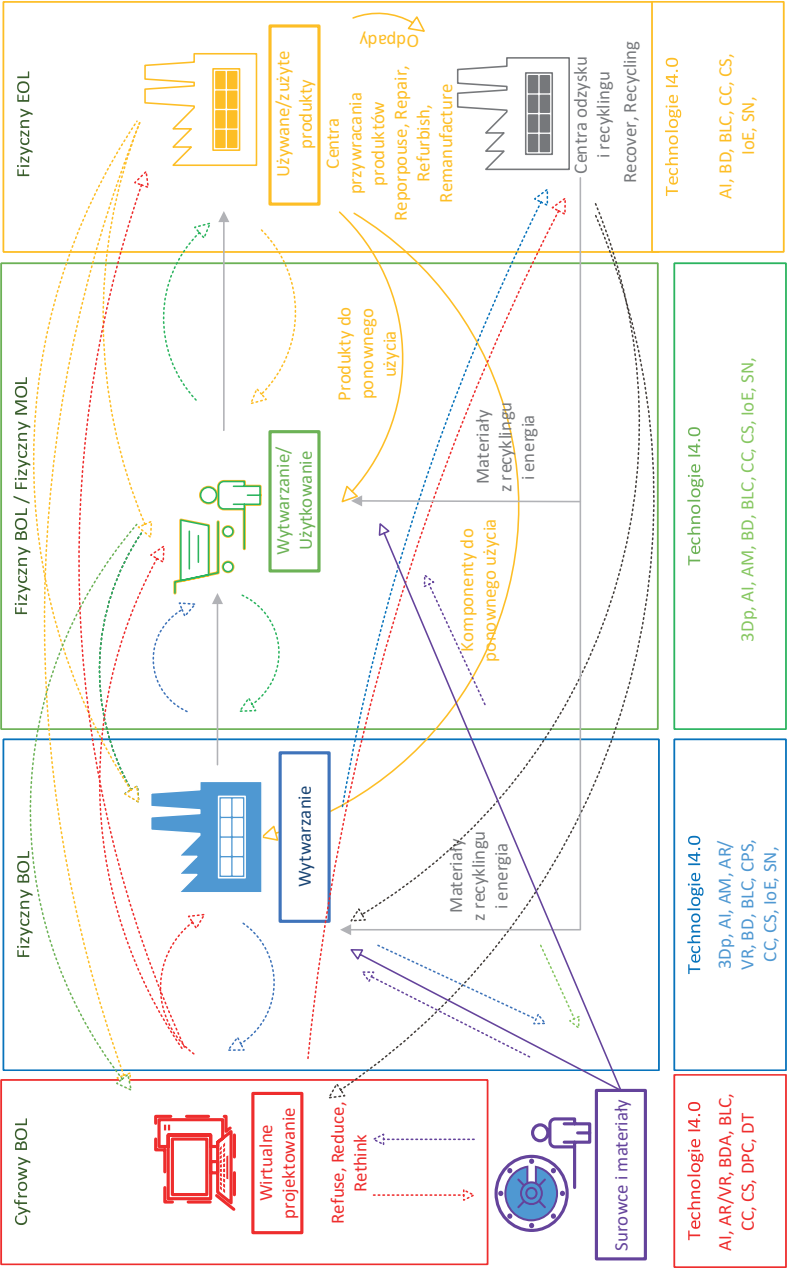
- procesu cyfrowego PD, czyli warstwie wykorzystującej dotychczasową wiedzę z zakresu projektowania i rozwoju produktu, zarządzania wiedzą i cyklem życia produktu wspomaganą technologiami I 4.0,
- przepływu informacji w procesie cyfrowego projektowania, wytwarzania projektowanego wyrobu, dostarczania go na rynek, użytkowania oraz informacji o zakończeniu jego użytkowania lub jego zużyciu,
- przepływu komponentów, wyrobów ostatecznych itp. w procesie wytwarzania projektowanego wyrobu, dostarczania go na rynek, użytkowania oraz przepływu odwrotnego zużytego produktu lub produktu, którego użytkownik zakończył użytkowanie.

W ten sposób można wyodrębnić następujące fazy cyklu życia produktu DfX 4.0 wraz z interesariuszami je reprezentującymi:

- cyfrowy początek cyklu życia produktu – cyfrowy BoL (organizacja),
- wytwarzanie wyrobów – fizyczny BoL (organizacja lub przemysłowe otoczenie zewnętrzne lub konsument),
- użytkowanie wyrobów – fizyczny MoL (konsument),
- koniec użytkowania produktu lub jego zużycie – fizyczny EoL (organizacja lub przemysłowe otoczenie zewnętrzne).

Poglądowy rysunek koncepcji DfX 4.0 prezentuje rysunek 44.

Chcąc przedstawić logikę nowego spojrzenia na proces DfX 4.0, należałoby zaprezentować profile trzech grup interesariuszy będących uczestnikami procesu PD, tj. organizacji, gdzie realizowany jest proces PD, otoczenia zewnętrznego, będącego do dyspozycji przedsiębiorstwa, oraz samych konsumentów, czyli kluczowych beneficjentów projektowanych wyrobów. Biancolin i współautorzy podzielili uczestników cyrkularnej logistyki odwrotnej (CRL), będącej częścią DfX 4.0, na głównych aktorów CRL (wytwórców, dostawców, podmioty 3PL, sprzedawców oraz inne organizacje, w tym *non profit*) oraz aktorów zewnętrznych (klientów, rząd oraz instytucje naukowe)<sup>12</sup>.



**Rysunek 44.** Koncepcja DfX 4.0 – fazy cyklu życia produktu, przepływy dóbr i informacji, zadania gospodarki cykularnej oraz wykorzystywane technologie I4.0  
**Źródło:** opracowanie własne.

Organizacja realizująca proces DfX 4.0 stara się dążyć do neutralnego oddziaływania lub wywierania pozytywnego wpływu swoich działań na środowisko naturalne oraz społeczności. Przejawia się to minimalizacją wykorzystania nowych surowców, materiałów, części, podzespołów – komponentów na rzecz tych, które przy możliwie najmniejszych nakładach zasobów można odzyskać z produktów znajdujących się na rynku w fazie EoL cyklu życia produktu. Aktywność organizacji w kierunku pozytywnego wpływu na społeczności wiąże się z zerwaniem z „makiawelizmem biznesowym”, w którym najważniejszym elementem od ponad 100 lat jest minimalizacja kosztów i czasu przy akceptowalnym przez klienta poziomie relacji cena – jakość na rzecz sprawiedliwego i równoważnego społecznie podziału zysków. Do tego celu wykorzystuje się technologie I 4.0, tworząc inteligentne (środowiskowo, społecznie i funkcjonalnie) produkty (SP).

Otoczenie zewnętrzne wpisuje się w cele środowiskowe i społeczne, dostarczając rozwiązań, które umożliwiają realizację celów DfX 4.0. Powszechną praktyką powinno być dzielenie się wiedzą w kierunku promowania rozwiązań pozytywnie wpływających na środowisko naturalne oraz społeczności. Możliwy jest także wariant dzielenia się zyskami firmy na rzecz zrównoważenia otoczenia, w którym funkcjonuje przedsiębiorstwo. Oprócz organizacji dostępne są także centra przywracania produktów – *Product & Components Restoration Center* (P&CRC) – wyposażone w wiedzę z VPD pozwalającą poprzez naprawę, regenerację, odnowienie, zmianę funkcji użytkowych przywracać produkty lub komponenty do ponownego obiegu rynkowego (konsument) bądź przemysłowego (producent). Druga grupa podmiotów to centra recyklingu oraz odzysku (*Recycling and Recovery Centers* – R&RC). Tutaj produkty poddawane są recyklingowi, a w przypadku braku możliwości jego wykorzystania wytwory przetwarzane są na energię. W tym obszarze istotne jest także zaangażowanie się instytucji państwowych, naukowych oraz innych podmiotów wspierających projektowanie produktów oparte na obiegu zamkniętym.

Ostatnia grupa interesariuszy to konsumenci (klienci), czyli beneficjenci projektowanych i rozwijanych przez organizację produktów. Głównym wyzwaniem jest zmiana ich sposobu funkcjonowania na rynku z głębokiego konsumpcjonizmu na styl racjonalnego oszczędzania i współdzielenia się na zrównoważonym rynku. Mogą być oni posiadaczami domowych technologii AM w postaci drukarek 3D, co pozwala im wytwarzać produkty poprzez nabycie VPD.

Cyfrowy BoL wiąże się z procesem VPD, w którym nie istnieje żadna fizyczna warstwa, np. wirtualne szkicowanie VS, modelowanie VM<sub>D</sub>, czy też prototypowanie VP. Poprzez wykorzystanie technologii I 4.0 bazujących na cyfrowych bliźniakach (DT) umożliwia przeniesienie świata realnego do świata wirtualnego. Przeprowadzanie modelowania i symulacji odbywa się przy wykorzystaniu AR/VR. Oznacza to stworzenie środowiska, w którym projektanci przygotowują cyfrową wersję projektowanego produktu (*Digital Product Code* – DPC). DPC może posłużyć nie tylko zakładom produkcyjnym wytwarzającym projektowane produkty, ale i klientom, którzy w ramach prywatnych maszyn AM – 3DP mogą produkować zaprojektowane



wyroby. Ważnym elementem DPC jest także aspekt środowiskowy. W projekcie produktu przewidziano bowiem konieczność jego dekompozycji (demonażu) w momencie przejścia do fazy EoL. Poza dotychczas wykorzystywanymi metodami, technikami i narzędziami zastosowanie znajdują tu następujące technologie I 4.0:

- chmura obliczeniowa (CC) oraz analityka dużych zbiorów danych (BDA) w celu identyfikacji świadomych i nieświadomych potrzeb klienta,
- sztuczna inteligencja (AI) – wsparcie w sferze kreowania koncepcji,
- rozszerzona i wirtualna rzeczywistość (AR/VR) – wsparcie w sferze wizualizacji i testowania projektowanych produktów,
- cyberbezpieczeństwo (CS) wspierane technologią BLC,
- IoE oraz SN jako technologie, które powinien zawierać projekt produktu w celu pozyskiwania informacji o wytworze oraz jego komponentach w fazach BoL, MoL oraz EoL.

W procesie VPD konieczne jest pozyskiwanie informacji. Część z nich pochodzi z konwencjonalnych, klasycznych źródeł, tzn. dostawcy surowców i materiałów, wytwarzania oraz użytkowania. Druga część wiąże się z nowymi źródłami obsługującymi produkty, które klienci przestali używać lub tymi już zużytymi. Chodzi tu o centra przywracania produktów (produktów używanych i zużytych) oraz źródeł dostarczających wtórne surowce, materiały, części, komponenty (komponenty wtórne – S.C.) itp. oraz o centra odzysku i utylizacji (R&RC). Przyjmując takie założenie, należy zwrócić uwagę, że w fazie VPD projektanci poprzez systemy informatyczne powinni być zaopatrywani w wiedzę o dostępnych z różnych źródeł komponentach, przy czym te pochodzące z P&CRC oraz R&RC, zgodnie z założeniami gospodarki cyrkularnej, powinny mieć nadany priorytet użycia. Oznacza to, że projektanci, a w następnym kroku wytwórcy muszą uwzględniać używane komponenty lub produkty w swoich projektach oraz wytworach.

W ten sposób w fazie VPD dostarczane są informacje dotyczące możliwych do wykorzystania w projektowanym wyrobie komponentów wtórnych, które mają priorytet w stosunku do surowców i materiałów. Te ostatnie wykorzystuje się dopiero wtedy, gdy na rynku wtórnym nie ma konkretnych komponentów.

Fazę cyfrowego BoL kończy zapisany cyfrowo kod produktu (DPC), który stanowi bazę dla przedsiębiorstw produkcyjnych lub dla klientów. Jeśli bowiem posiadają oni technologie wytwarzania addytywnego, mogą wyprodukować wyroby we własnym zakresie (DIY). DPC, oprócz cyfrowo zapisanych cech i właściwości produktu, posiada także informacje dotyczące zestawienia materiałowego (*Bill of Materials* – BoM), które mogą okazać się przydatne nie tylko w procesie wytwarzania, ale także w trakcie eksploatacji (MoL) oraz demontażu produktu w fazie cyklu życia EoL.

Proces wytwarzania produktu cechuje fizyczny przepływ materiałów, który może być ulokowany w dwóch miejscach:

- w zakładach produkcyjnych posiadających konkretną technologię,
- u ostatecznych odbiorców dysponujących technologią wytwarzania addytywnego, np. druku 3D.



W jednym i drugim przypadku wykorzystywane są informacje zawarte w DPC. W ten sposób DPC może być dystrybuowany cyfrowo w różne miejsca. Na tym etapie następuje wytwarzanie wyrobów cechujących się wysokim stopniem nasycenia czujnikami, które następnie włączane są wraz z ich komponentami do Internetu Wszystkiego (IoE). Bazy danych odbierające sygnały czujników rozpoczynają tym samym gromadzenie informacji w chmurze CC. Ich celem jest analityka BDA oraz raportowanie o stanie zużycia komponentów i wyrobów gotowych. Fazę wytwarzania zaopatruje się w trzy rodzaje komponentów wg zaprezentowanej poniżej kolejności:

- komponenty naprawione, regenerowane, odnowione, zmieniające cel wykorzystania, ponownie użyte itp. pochodzące z PRC,
- komponenty pozyskane z recyklingu – źródło pochodzenia R&RC,
- nowe komponenty, czyli nowo pozyskane surowce, materiały, nowo wytworzone części itp.

Należy przy tym zwrócić uwagę, że w ten sposób mogą być zaopatrywane zarówno przedsiębiorstwa produkcyjne, jak konsumenci produkujący wyroby we własnym zakresie (DIY).

W ramach wykorzystywanych w tej fazie rozwiązań I 4.0 można wyróżnić:

- odpowiadające za fizyczną sferę wytwarzania systemy cyberfizyczne – CPS wspomagane wytwarzaniem addytywnym AM wykorzystującym np. technologie druku 3DP,
- duże zbiory danych, ich analizę, chmurę obliczeniową oraz dostęp do danych w czasie rzeczywistym,
- zabezpieczenie systemów IT oraz ICT – cyberbezpieczeństwo CS oraz *Blockchain* BLC,
- wdrożone rozwiązania IoE, w tym czujników noszonych  $VD_{VC}$ , w większości komponentów oraz systemów produktu i w samym produkcie.

W fazie fizycznego BoL informacje dotyczące wykorzystywanych surowców i materiałów zawarte są w DPC. Wynika to z faktu, że już w trakcie projektowania przeprowadzana jest krytyczna analiza dostępnych i możliwych do wykorzystania komponentów znajdujących się na rynku (priorytet wykorzystania komponentów wtórnych). Zrywa to nieco z dotychczasową praktyką przemysłową, w której projekt zawierał specyfikację materiałową, a za zakup komponentów do produkcji odpowiadał wyłącznie dział zakupów danego przedsiębiorstwa produkcyjnego. DPC zawierają rekomendację co do wykorzystania komponentów wtórnych, wskazując miejsca ich pozyskania. Decyzja co do wykorzystywanych materiałów podejmowana jest przez podmioty je wytwarzające.

Kolejna faza cyklu życia produktu to jego eksploatacja (MoL). To na tym etapie wyposażone i bazujące na sieci czujników (SN) wyroby generują dane poprzez IoE. Faza fizycznego użytkowania produktów przez konsumentów ogranicza się w zasadzie do gromadzenia informacji o znajdujących się na rynku wyrobach. Poza danymi wiążącymi się z fizycznym korzystaniem z produktów przez użytkownika zbierane są również takie informacje, które docelowo mogą służyć uwarunkowaniom:

- marketingowym (identyfikacja nowo pojawiających się potrzeb, analiza stopnia spełnienia zidentyfikowanych potrzeb przez produkt),
- jakościowym (śledzenie sposobów radzenia sobie klienta z problemami podczas użytkowania produktów, monitorowanie sukcesywnego zużywania się produktu, poprawa funkcjonalności),
- usługowym (przewidywanie i informowanie o zużywaniu się komponentów, możliwych awariach produktu, dostępnych aktualizacjach, produktach komplementarnych, możliwych do uruchomienia nowych funkcjonalnościach),
- projektowym (śledzenie miejsca przebywania produktów oraz komponentów, identyfikacja stopnia zużycia wytworów oraz komponentów, czasu i intensywności ich eksploatacji),
- innym.

Na tym etapie kluczowe są informacje dotyczące stopnia zużycia poszczególnych komponentów. Mogą one być wykorzystywane przynajmniej w trzech obszarach:

- 1) rynkowym – umożliwiającym oferowanie przedsiębiorstwu usług serwisowo-naprawczych,
- 2) cyrkularnym – pozwalającym przewidywać dostępność poszczególnych używanych lub zużytych komponentów w perspektywie projektowania wyrobów,
- 3) hybrydowym – łączącym obszary tradycyjne i cyrkularne.

Szczególnie istotny jest kontekst cyrkularny, który kształtuje potencjalną podaż na komponenty wtórne ( $S_{COM}$ ) w najbliższych okresach. Pozwala to nie tylko dostarczać ważnych informacji przy realizacji projektów nowych produktów lub ich rozwoju (dostępność komponentów wtórnych), ale także planować działania gospodarki cyrkularnej związane z regeneracją, zmianą przeznaczenia, odnowieniem lub innymi tego typu aktywnościami. W ten sposób przedsiębiorstwa rozpoczęłyby zarządzanie komponentami wtórnymi nie tylko w obszarze ich ponownego wykorzystania, ale także dodatkowych działań, które pozwoliłyby włączyć SC do ponownego obiegu.

Ta faza wykorzystuje głównie narzędzia I 4.0 związane z pozyskiwaniem, przechowywaniem, analizowaniem oraz zabezpieczaniem danych, a więc:

- czujniki oraz SN,
- IoE,
- CC, BD,
- BDA, AI,
- CS, BLC.

Ostatnia faza cyklu życia produktu to EoL. To w niej ostateczni użytkownicy pozbywają się używanych albo zużytych produktów. Etap ten związany jest z działaniami leżącymi po stronie kilku grup interesariuszy. Możliwe są bowiem przynajmniej trzy scenariusze odbioru lub zwrotu zużytych (używanych) wyrobów, które zależą od trzech grup inicjujących ten proces:

- przedsiębiorstw (posiadają własne systemy logistyki odwrotnej),
- podmiotów zewnętrznych (centra przywracania PRC lub centra recyklingu i odzysku R&RC),

- konsumentów (dokonują demontażu produktów oraz ich zwrotu we własnym zakresie do przedsiębiorstw, które wytworzyły dany produkt lub do podmiotów zewnętrznych PRC lub R&RC).

W każdym z przypadków rozpoczyna się odwrotny przepływ produktów w ramach logistyki, tzn. zużyte lub używane wyroby, w całości lub zdemontowane wraz z komponentami wtórnymi wracają w odwrotnej kolejności przez poszczególne fazy logistyczne, czyli od dystrybucji poprzez wytwarzanie aż do sfery zaopatrzenia. Oczywiście możliwość zatrzymania się produktu lub komponentów wtórnych w danej fazie jest ściśle powiązane z potrzebami rynku, a w przypadku projektowania wyrobów z planowaną lub/i projektowaną architekturą produktu.

W celu odbioru zużytych lub używanych produktów wraz z komponentami wtórnymi zarówno przedsiębiorstwa, jak i podmioty zewnętrzne stają przed koniecznością implementacji zaprojektowanego i zorganizowanego układu różnorodnych zasobów. Należy przy tym zwrócić uwagę, że jego kluczowymi elementami są wytyczne dotyczące projektowania wykorzystującego SC (*Design for Secondary Components* – DfS<sub>COM</sub>) w różnych fazach cyklu życia produktu (BoL/MoL/EoL) oraz przez różnorodnych użytkowników (przedsiębiorstwa, podmioty zewnętrzne, konsumentów). W ten sposób w przypadku firm oraz podmiotów zewnętrznych fundamentalnym zagadnieniem staje się logistyka odwrotna, z kolei w odniesieniu do konsumentów nowe modele biznesowe łamiące dotychczasowe paradygmaty, wśród których dominuje optymalizacja czasu, kosztów i jakości (wytwarzanie w jak najkrótszym czasie, przy jak najniższych kosztach i przy zachowaniu jakości akceptowalnej przez klienta)<sup>13</sup> oraz chęć posiadania wyłącznie nowych produktów<sup>14</sup>.

Zaangażowanie ostatecznego użytkownika jest na tym etapie kluczowe, ponieważ może on w ramach własnej inicjatywy wprowadzić używany produkt na rynek lub też zdemontować zużyty wyrób, dostarczając części do powszechnie dostępnych punktów odbioru (stworzonych przez przedsiębiorstwa lub przez podmioty zewnętrzne). Aby mógł to zrobić, potrzebne są do tego dostarczone przez producenta instrukcje demontażu (czarne skrzynki produktów). Klient może także posłużyć się odwróconą instrukcją obsługi (*Reverse Manuals* – RM), dzięki której – wykonując operacje demontażu od ostatniego etapu montażu – jest w stanie rozłożyć produkt na czynniki pierwsze.

W przypadku braku chęci do takiego działania konsument może zlecić odbiór zużytego wyrobu wyspecjalizowanym do tego celu podmiotom, które to w następnej kolejności dostarczają towar do centrum przywracania produktów i komponentów (P&CRC). Zadaniem P&CRC jest ponowne wdrożenie do obiegu używanych

13 Nie ma tu chyba wątpliwości, że czasy jakości totalnej, formułującej zasady pełnej satysfakcji klienta, której reprezentantem była filozofia *Total Quality Management* (TQM), odeszły już do przeszłości.

14 Interesująca może być koncepcja powszechnego konsumpcjonizmu wykorzystującego wyłącznie produkty wtórne.

produktów lub komponentów poprzez ponowne użycie, zmianę przeznaczenia produktu, regenerację lub odnowienie.

W przypadku wytworów lub komponentów podlegających całkowitemu zużyciu przekazywane są one dalej, czyli do centrum recyklingu i odzysku, gdzie poddawane są recyklingowi lub odzyskiwana jest z nich energia (np. w procesie spalania). Przywrócone procesem recyklingu materiały trafiają do przedsiębiorstwa produkcyjnego lub do klientów posiadających technologie wytwarzania addytywnego.

Jeśli chodzi o wykorzystywane technologie I4.0, to są one identyczne jak w przypadku fazy MoL:

- zbieranie i analiza dużych zbiorów danych – SN, BDA, CC, AI,
- cyberbezpieczeństwo CS wykorzystujące BLC.

Informacje z P&CRC oraz R&RC dostarczane są do systemów informatycznych projektantów, którzy w tym momencie mają możliwość śledzenia podaży na konkretne komponenty wtórne  $S_{COM}$ . Drugimi odbiorcami informacji są wytwórcy, którzy mogą otrzymać informację na temat dostępnych na rynku  $S_{COM}$ .

### 5.3. Wyzwania stojące przed koncepcją projektowania wspomagającego doskonałość 4.0 oraz potencjalne luki badawcze

Zaprezentowane przemyslenia dotyczące projektowania wspomagającego doskonałość w dobie I 4.0 obrazują szereg wyzwań stojących przed trzema kluczowymi obszarami:

- ekonomicznym,
- społecznym,
- edukacyjno-badawczym.

Obszar ekonomiczny powiązany jest z pierwszą z grup interesariuszy przemysłowych, czyli samymi **przedsiębiorstwami**. Opierają się one w wielu przypadkach na istniejącym praktycznie od początku drugiej rewolucji przemysłowej paradygmacie C/T/Q. Upraszcza on nieco działanie przedsiębiorstw do najprostszego rachunku ekonomicznego bazującego na produktywności w myśl zasady, że efekt powinien być większy od nakładów. W gruncie rzeczy tego typu myślenie sprowadza wszystko do parametru kosztowego przy zachowaniu konkurencyjności, jeśli chodzi o dwa pozostałe elementy, czyli czas i jakość. Czas odgrywa tu podwójną rolę. Z jednej strony staje się składnikiem kosztów (wyprodukowanie większej liczby elementów w danej jednostce czasu przekłada się na wzrost efektywności wykorzystania

zasobów). Z drugiej strony uznaje się go za ważny czynnik kształtujący konkurencyjność organizacji, decydujący o zachowaniach nabywczych klientów. Z kolei jakość przeznaczona jest głównie dla odbiorców, gwarantując bądź to zachowanie właściwego standardu, bądź to (jak sformułowano to w ramach koncepcji TQM) pełną satysfakcję klienta.

Zdanie często używane przez praktyków „każdy wie, jak działa biznes” skutecznie zatrzymuje możliwości poszukiwania nowych kierunków jego rozwoju. Można porównać to do patrzenia na prowadzoną działalność przez pryzmat okularów „zawężonej rzeczywistości” (*Narrowed Reality* – NR), w której optymalizacja kosztów i czasu w celu uzyskania zadawalającej jakości staje się kluczowa. Przesłania to wiele innych kwestii, które powinny być także uwzględniane w modelach biznesowych.

Według autora optymalizacja paradygmatu C/T/Q dochodzi jednak do pewnych granic. Przenoszenie działalności produkcyjnej w regiony, w których koszty pracy pracowników są niższe, zaczyna napotykać na różnego rodzaju ograniczenia natury społecznej, ekonomicznej czy też środowiskowej. Zarówno automatyzacja, jak i informatyzacja (dorobek trzeciej rewolucji przemysłowej) doprowadzają procesy do ich optimum w kontekście C/T/Q bez perspektywy dalszego progresu lub progresu niewspółmiernie mniejszego od zainwestowanego kapitału. Zgodnie z teorią ograniczeń (*Theory of Constraints* – TOC) Goldratta<sup>15</sup> doskonalenie jednych procesów obnaża niedoskonałość innych. W tym wypadku brak poszerzenia horyzontów biznesowych o nowe modele skazuje przedsiębiorstwa na konieczność funkcjonowania w przestarzałych systemach wytwórczych, co z kolei determinuje stagnację działalności PD. Stagnacja ta przejawia się w wykorzystywaniu sprawdzonych rozwiązań DfX, których fundamenty bazują na automatyzacji i komputeryzacji.

Fakty związane z dynamicznymi zmianami klimatycznymi, przekształcającymi się społeczeństwami oraz gospodarkami powinny inspirować przedsiębiorstwa do wdrażania konkretnych innowacji i nowości nadążających za wymaganiami płynącymi z otoczenia. Niestety, wydaje się, że tempo zmian zachodzących na zewnątrz przedsiębiorstw jest zdecydowanie szybsze aniżeli reakcje organizacji. Ważnym elementem wsparcia przedsiębiorstw w tych kwestiach mogłyby być technologie I 4.0, które pozwalają łączyć świat realny i cyfrowy w jeden byt. Należy przy tym zauważyć, że stopniowe i elastyczne wdrażanie nowoczesnych technologii na bazie paradygmatu C/T/Q w dalszym ciągu będzie utrzymywać przestarzałe już zasady funkcjonowania biznesu. Być może nadszedł czas, aby dotychczasowy paradygmat zamienić na nowy, zapewniający w pierwszej kolejności realizację celów zrównoważonego rozwoju, a następnie przynoszący korzyści społeczeństwu i dopiero na końcu pozwalający odnieść sukces organizacji (*Sustainable, Socially Satisfying, Successful for Organization* – 3S). Dotychczasowy paradygmat C/T/Q w zasadzie może być odniesiony do kwestii sukcesu organizacyjnego z niewielkim wpływem na kwestie społeczne. Zmiana konstrukcji i priorytetów działania przedsiębiorstw

15 E. Goldratt, J. Fox, *Cel I. Doskonałość w produkcji*, Warszawa 2000.

produkcyjnych umożliwiłaby redefinicję modeli biznesowych, uwzględnienie w nich w szerszym stopniu aniżeli teraz kwestii etycznych, a to z kolei mogłoby przełożyć się na zmiany w obszarze PD.

Drugi z omawianych obszarów dotyczy kwestii **społecznych**. Zapewnienie wysokiej personalizacji produktów zbieżne z nowymi modelami biznesowym (np. *User Designed* oraz *Mass Customization*) czy też długowieczność produktów pozwalająca im na wielokrotną zmianę właściciela (bazująca na modelu *Trash to Cash*), przeznaczenia itp. w całym cyklu ich życia stanowią istotne wyzwanie stojące przed konsumentami produktów projektowanych w ramach koncepcji DfX 4.0. W głównej mierze opiera się ono na zmianie dotychczasowych nawyków konsumenckich. Konieczność uwzględniania w projektowanych wyrobach używanych, regenerowanych lub innych komponentów wtórnych wiąże się z akceptacją przez odbiorców redefinicji pojęcia nowy produkt. Co więcej, możliwości, które stwarza wytwarzanie addytywne (AM), mogą doprowadzić do zmiany charakteru produktu z fizycznego na cyfrowy. Zakupiony program sterujący wytwarzaniem fizycznego produktu na drukarce 3D byłby obiektem wymiany rynkowej, a samo wytwarzanie mogłoby przebiegać w układzie „zrób to sam” (*Do it Yourself* – DIY) wspieranym rozwiązaniami typu „uprawiaj to sam” (*Grow it Yourself* – GIY). Oczywiście wokół tego typu rozwiązań cyfrowych produktów (*Digital Product Code* – DP) może powstać cały szereg usługodawców produkcyjnych, realizujących konkretne usługi produkcyjne. Nie zmienia to jednak faktu, że możliwości AM stwarzają także perspektywę wykorzystywania technologii 3D przez samych konsumentów.

Innym scenariuszem zmian nawyków, wynikających z założeń gospodarki cyrkularnej i projektowania DfX 4.0, jest ustalenie nowych standardów postępowania przez konsumentów z produktami używanymi i zużytymi (UP). Dotychczasowy schemat, który bazował na utylizacji tych wytworów, będzie musiał ulec diametralnej zmianie. Nie chodzi tu tylko o model wyrzucania UP, których naprawa jest nieopłacalna, ale także o zasadność przekazywania używanych produktów do dalszego ich wykorzystywania i całkowitego zużycia. Być może tego typu przyzwyczajenia i założenia nie są do końca zasadne w perspektywie wykorzystywania używanych części w nowych wyrobach. Wymagać to będzie wzmocnionych badań nad tym zagadnieniem, ale przede wszystkim zmiany nawyków konsumenckich.

Wspomniana zmiana nawyków powinna wynikać z kwestii świadomości zarówno przedsiębiorstw, jak i konsumentów. Świadomość ta może być kształtowana przez edukację czy też różnorodne programy społeczne, ale istnieje szereg badań pokazujących pozytywne i słabe strony tego typu rozwiązań<sup>16</sup>. Istotna wydaje się zatem kwestia edukacji tak przedsiębiorców, jak i konsumentów w tej materii, a w zasadzie sposób stworzenia adekwatnego do potrzeb systemu.

16 A. Chaudhary, F. Sudzina, B. Mikkelsen, *Promoting Healthy Eating among Young People – A Review of the Evidence of the Impact of School-Based Interventions*, „Nutrients” 2020, vol. 12, Article 2894.



Kwestie **edukacyjno-badawcze** wymagają systemowego podejścia, ale przede wszystkim jedności i akceptacji postawionych przed takim systemem celów. To z kolei powinno wynikać z przyjętych długookresowych strategii rozwoju, które, jak można zaobserwować w otaczającej nas rzeczywistości, występują niezwykle rzadko. Jeśli już się pojawiają, np. realizacja celów zrównoważonego rozwoju do roku 2030, to brakuje jedności i akceptacji ich realizacji przez różnorodnych interesariuszy, co skutecznie utrudnia osiągnięcie postawionych przed strategią zadań.

Na chwilę obecną nie ma zatem możliwości masowego edukowania konsumentów zmieniającego ich nawyki, a różne stadia rozwoju państw i gospodarek czynią ten proces jeszcze bardziej skomplikowanym. Z kolei działalność organizacji *non profit* (*Non-Profit Organizations* – NPO), pożytku publicznego (*Public Benefit Organization* – PBO) lub pozarządowych (*Non-Government Organizations* – NGO), które w swoich założeniach mogą realizować tego typu cele edukacyjne, jest na tyle rozproszona, że nie ma możliwości dotarcia do szerszej grupy odbiorców.

Podobnie wygląda problem edukacji przedsiębiorstw, w wypadku których podejmowanie wszelkich aktywności i zmian opiera się na prostym rachunku ekonomicznym: koszt–przychód–zysk. Kształtowanie świadomości przedsiębiorców w zakresie konieczności uwzględniania chociażby kwestii zrównoważonego rozwoju, zgodnie z dotychczasowymi standardami, powinno przekładać się na konkretne efekty ekonomiczne, podobnie zresztą jak projekt produktu uwzględniający wspomniane aspekty. Oznacza to, że konieczne jest zaproponowanie nowego spojrzenia na dotychczasowo prowadzoną działalność gospodarczą, aby można było wdrożyć świeże podejście do projektowania produktów. W tym miejscu pojawia się szereg pytań na temat szczegółowych kwestii dotyczących kształtu omawianej działalności i jej modelu. Zaprezentowana w pracy koncepcja DfX 4.0 pokazuje bowiem istotę działania nowego systemu, ale nie obrazuje szacunkowych obliczeń, np. kosztów oraz szczegółowych procesów, co może utrudniać jej implementację. Niemniej wskazuje to kolejną lukę badawczą, która może być uzupełniona przez prace naukowo-badawcze zajmujące się tą materią.

Należy zauważyć, że wspomniane prace naukowo-badawcze powinny być rozumiane w kontekście dwóch podstawowych grup, tzn. przedsiębiorstw i ich otoczenia. Zmiana dotychczasowych paradygmatów funkcjonowania modeli ekonomicznych, przekładająca się na procesy biznesowe poszczególnych firm (w tym procesy PD), determinuje szeroki wachlarz działań. Analizując chociażby literaturę z zakresu technologii I 4.0 wykorzystywanych w procesach DfX, można zauważyć, że większość badań odnosi się do systematycznego przeglądu opracowań w tym zakresie lub pojedynczych studiów przypadku zastosowania konkretnej technologii I 4.0 w konkretnym obszarze biznesowym. Pokazuje to, że aktualny dorobek naukowo-badawczy na ten temat jest dopiero na etapie badań wstępnych oraz określania kierunku badań właściwych.

Zaprezentowany w pracy przegląd literatury pokazuje wiele trendów badań w kontekście DfX 4.0. Należy jednak zwrócić uwagę, że na bazie tak gruntownie



przeprowadzonego przeglądu pojawia się także cała gama luk badawczych, które pozostawiają koncepcję DfX 4.0 z szeregiem pytań.

Wspomniane braki można, zdaniem autora, rozpatrywać w dwóch wymiarach:

- strategicznym,
- operacyjnym.

Pierwszy z nich odnosi się do całościowego spojrzenia na proces DfX oraz zobrażenia go w postaci koncepcyjnej lub modelowej. W tym wymiarze brakuje opracowań, które całościowo podchodziłyby do omawianego zagadnienia, a zaprezentowana w pracy koncepcja DfX 4.0 może być jednym z przykładów tego typu rozwiązań.

W obszarze operacyjnym można wyróżnić trzy kategorie luk badawczych związanych z prezentowanym opracowaniem, do których zaliczono kategorie:

- technologiczne,
- organizacyjne,
- prawne.

Kwestie technologiczne poruszają zagadnienia łączące się głównie z technologiami I 4.0 oraz IT/ICT. Powstaje tutaj szereg pytań badawczych związanych przykładowo z:

- określeniem zakresu i ram wykorzystania technologii IT/ICT przemysłu 4.0 w wybranych obszarach PD,
- optymalizacją technologii wytwarzania addytywnego, w tym druku 3D,
- kompatybilnością języka kodowania projektowanych produktów i udostępniania DP (platformy informatyczne PD, język kodowania wykorzystywany przez technologię wytwarzania addytywnego – AM, np. technologii druku 3D, systemy identyfikacji towarowej wykorzystywane przez centra recyklingu lub centra produktów używanych i zużytych – UP),
- określeniem zakresu, ram i funkcjonalności platform obsługujących Internet Wszystkiego (IoE), z uwzględnieniem konieczności włączenia do IoE materiałów, surowców, w tym komponentów wtórnych, oraz wysokiego nasycenia wyrobów gotowych czujnikami komunikującymi się poprzez IoE.

Kwestie organizacyjne dotyczą obszaru zarządzania DfX 4.0 i mogą nawiązywać do następujących zagadnień:

- współpraca na linii roboty–autonomiczne pojazdy–człowiek,
- zdefiniowanie mierników, wskaźników i innych narzędzi pozwalających na dokonywanie pomiaru i zarządzania stopniem zużycia wyrobów gotowych,
- stworzenie koncepcji i założeń systemu informującego o stopniu zużycia produktów,
- stworzenie koncepcji zarządzania cyklem życia produktu (PLM) uwzględniającej odbiór UP w celu otrzymania komponentów wtórnych,
- projektowanie produktów uwzględniające nowe modele biznesowe, np. wyposażanie produktów tylko w funkcjonalności niezbędne do realizacji ich pierwotnych założeń (zbieżne z modelem *No Frills*),

- wykorzystywanie w produktach możliwie największej ilości komponentów odebranych z rynku z produktów posiadających status EoL.

Nie mniej istotne pozostają kwestie **prawne**. Stanowienie prawa w tak dynamicznie zmieniającym się otoczeniu<sup>17</sup> wykorzystującym dotychczas niespotykane technologie jawi się jako bardzo duże wyzwanie. Dopiero 13 marca 2024 roku, niemalże pół roku po uruchomieniu pierwszych masowych aplikacji obsługujących sztuczną inteligencję, Parlament Europejski przyjął rozporządzenie dotyczące sztucznej inteligencji (AI Act)<sup>18</sup>. Oznacza to, że przez niemal pół roku użytkownicy np. Chatu GPT mogli generować informacje, rozwiązania i inne, które nie były objęte ramami prawnymi. W procesie projektowania kwestie prawne dotyczą także wielu innych interesujących aspektów, do których można zaliczyć obszary:

- pojęciowy – usystematyzowania pojęcia nowego produktu (jaki procent części używanych, pochodzących z recyklingu, regenerowanych, odnowionych itp. może zawierać nowy produkt), używanego produktu, zużytego produktu itd.,
- gwarancyjny – udzielania gwarancji (np. na produkty z używanymi częściami, pochodzącymi od przedsiębiorstwa, ale także z obcych źródeł, na produkty używane – *Second Hand* czy też produkty regenerowane),
- podatkowy – motywujących przedsiębiorstwa do działania w kierunku DfX 4.0 wykorzystującego kwestie gospodarki o obiegu zamkniętym (np. preferencje w podatkach dla przedsiębiorstw funkcjonujących w ramach gospodarki wtórnej, ulgi podatkowe dla konsumentów aktywnie włączających się w te działania),
- unifikacji prawnej – globalna gospodarka wymaga zunifikowanego prawa, szczególnie w dobie produktów cyfrowych, praw autorskich, kopiowania wyrobów cyfrowych itp.,
- egzekucyjny – jak egzekwować konieczność zmiany nawyków; o ile kwestia zapewnienia egzekucji pewnych założeń DfX 4.0 i zmian dotychczasowych modeli biznesowych może wynikać z norm prawnych, o tyle należy mieć świadomość, że działają one zgoła odmiennie na przedsiębiorstwa oraz na konsumentów; skala narzędzi egzekwowania prawa w stosunku do przedsiębiorstw jest zdecydowanie szersza, co z kolei jest odwrotnie skorelowane z ich swobodą i wolnością działań; w przypadku konsumentów, chociażby ze względu na ich niewspółmiernie większą niż w przedsiębiorstwach liczebność, kwestia nakładania konkretnych obowiązków i ich egzekwowania wydaje się o wiele bardziej skomplikowana.

17 Poszerzyło pojęcie VUCA z lat osiemdziesiątych XX wieku (świat zmienny, niepewny, złożony i niejednoznaczny; zob. M. Minciu, F. Berar, R. Dobrea, *The Challenges of the VUCA World in the Development of Sustainable Investment Projects*, „Management and Economics Review” 2020, vol. 6, Issue 2, s. 197) o nowy, angielski akronim dzisiejszych czasów BANI (świat kruchy, niespokojny, nieliniowy i niezrozumiały); zob. S. Grabmeier, *BANI versus VUCA: a New Acronym to Describe the World*, 2020, <https://stephangrabmeier.de/bani-versus-vuca/> [dostęp: 25.04.2024].

18 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai> [dostęp: 24.04.2024].

Jak widać, przed projektowaniem wspomagającym doskonałość w wydaniu 4.0 (DfX 4.0) stoi szereg wyzwań. Logistyka odwrotna i łańcuchy dostaw o obiegu zamkniętym są tylko jednym z nich – pozwalają odzyskać z rynku wartościowe towary. W tym rozdziale nie poruszono podobnie skomplikowanego obszaru produkcji i zarządzania nią w warunkach projektowania DfX 4.0, a także jakości, która w takim przypadku wymaga poważnej redefinicji. Tworzy to ciekawe pole do przyszłych badań.

Sam model DfX 4.0 prezentuje tylko jedną perspektywę i w pewnym sensie wypełnia lukę literaturową dotyczącą kwestii projektowania produktów w XXI wieku. Jawi się on jako dobry punkt wyjścia do dyskusji nad tym, jak powinno wyglądać projektowanie w nieuniknionej erze zrównoważonego rozwoju.

Zaprezentowany model wskazuje również na szereg wyzwań stojących przed przemysłem i konsumentami, a także przed badaczami i edukatorami, którzy powinni pogodzić się z nieuchronną zmianą dotychczasowych modeli biznesowych.



# Podsumowanie

Projektowanie i rozwój produktów są aktywnością wymagającą multidyscyplinarnej wiedzy oraz umiejętności „zawodowej empatii”. Zawodowa czy też profesjonalna empatia to zdolność wsłuchiwania się w głosy potrzeb nie tylko klientów, ale także własnej organizacji wraz z jej otoczeniem zewnętrznym. Tworzą je dostawcy, konkurenci oraz całe gospodarki. Nie można pominąć tutaj kwestii środowiskowych i technologicznych, które stały się tematem prezentowanej pracy. Omawiana wielodyscyplinarność posiada dwa aspekty. Pierwszy, stanowiący swoistą odpowiedź projektantów na istotny kontekst, prezentowany jest przez koncepcję projektowania wspomagającego doskonałość (DfX) oraz jego konkretnych narzędzi. Drugi, pokazany w przeglądzie literatury, obrazuje, z jak wielu różnych obszarów naukowych pochodzą publikacje dotyczące projektowania.

W pracy udało się zidentyfikować ponad 60 aspektów wspomagania projektowania (DfX) od najbardziej oczywistych, związanych z wytwarzaniem, montażem, jakością czy logistyką, po bardzo szczegółowe łączące się z projektowaniem wspomagającym minimalizację wagi produktu, sieciowość czy też cykl biologiczny. Każdy z nich odnosił się do jednego z trzech podmiotów, tzn.:

- przedsiębiorstwa,
- klienta,
- otoczenia.

W pierwszym przypadku realizacja oczekiwań klientów przebiegała w taki sposób, aby projektowany wyrób był zoptymalizowany pod kątem samej organizacji i jej celów. W większości przypadków chodzi zatem o koszt i czas przy zachowaniu względnej jakości oferowanego produktu. Drugi wariant dotyczy oczekiwań samego klienta. Istotna jest tu zatem jakość, żywotność, reakcja na zmieniające się potrzeby. Trzeci z wariantów obejmuje szeroko rozumiane otoczenie, w którym działa organizacja, a więc kwestie społeczne, prawne oraz środowiskowe.

Rozpatrywanie wielodyscyplinarności w ujęciu koncepcji DfX napotyka jednak na wiele różnorodnych ograniczeń, z których najważniejsza wydaje się rozbieżność celów poszczególnych narzędzi DfX. Kluczową sprawą staje się zatem osiągnięcie balansu, swoistego kompromisu pomiędzy potrzebami przedsiębiorstwa, klienta oraz otoczenia, co często jest wypadkową działań optymalizujących projekt. Drugi ważny czynnik to właściwe sklasyfikowanie konkretnych narzędzi wspomagających

projektowanie i pogrupowanie, aby można było tworzyć efekt synergetyczny, tzn. wykorzystywać wspólnie te, które wzajemnie siebie uzupełniają.

O multidyscyplinarnym kształcie projektowania i rozwoju produktu świadczą obszary wiedzy prezentowanych publikacji, które w dość dużym stopniu obejmują kwestie inżynierii i nauk inżynieryjnych, a ponadto uzupełniane są one o nauki o środowisku, zarządzaniu, technologiach komputerowych, podejmowaniu decyzji czy też nauki społeczne. Warto odnotować fakt, że liczba publikacji dotyczących środowiskowego aspektu PD w ostatnich ośmiu latach była względnie wyrównana, przy wyraźnym wzroście opracowań na temat aspektów technologicznych. Niestety, zarówno w przypadku środowiskowego kontekstu PD, jak i technologicznego widać wyraźnie niewielkie sieci powiązań autorów, co może świadczyć o tym, że wskazana tematyka nie jest jeszcze tak ważna dla naukowców. Najczęściej pojawiające się w publikacjach słowa lub zwroty kluczowe w kontekście PD środowiskowego oraz technologicznego prezentuje rysunek 45.



**Rysunek 45.** Chmura słów najczęściej pojawiających się w opisywanej literaturze

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych badań.

Wśród słów dotyczących projektowania i rozwoju produktów wg aspektów środowiskowych dominują: „zrównoważony rozwój”, „środowisko”, „zielony”, „eko projekt” oraz „gospodarka w obiegu zamkniętym”. Z kolei kwestie technologiczne w przebadanej literaturze poruszają aspekty wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości, interakcji komputer–człowiek, sztucznej inteligencji, Internetu Rzeczy, Przemysłu 4.0 oraz komputerowego wspomagania projektowania. Oczywiście w naturalny sposób wyodrębniły się także słowa uzupełniające prezentowaną tematykę, takie jak zarządzanie wiedzą, zarządzanie cyklem życia produktu czy też zarządzanie projektami.

Na podstawie zaprezentowanego przeglądu literatury zauważamy, że brakuje na chwilę obecną publikacji podejmujących próbę holistycznego uchwycenia

projektowania i rozwoju produktów (np. opisana realizacja strategii masowej kustomizacji w inteligentnej fabryce) w dobie technologii I 4.0 oraz zmieniającego się stanu środowiska naturalnego. Artykuły odnosiły się w zasadzie do szczegółowych kontekstów opisywanych problemów, takich jak wykorzystanie konkretnych rozwiązań z obszaru IT, modeli decyzyjnych lub aspektów miękkich, np. kwestii komunikacji, działania zespołów czy też oceny projektów.

Jeśli chodzi o aspekt organizacyjny, to w tym obszarze poruszane były głównie konteksty konkretnych procesów związanych z całym cyklem życia produktu oraz możliwościami wykorzystania konkretnych platform (jak w przypadku platformy projektowej pomagającej dobrać do projektowanego wyrobu surowce, materiały i części z rynku wtórnego). Opisywano także niezbędne czynniki i uwarunkowania, które przedsiębiorstwa powinny brać pod uwagę w procesie wdrażania wybranych rozwiązań. Prezentowano również rozwiązania organizacyjne obrazujące możliwości danych technologii. W aspekcie organizacyjnym wyraźnie zabrakło ukazania kompleksowego wykorzystania technologii I 4.0 w procesach PD sprzyjającego celom zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Kontekst klienta i konsumenta prezentowany w analizowanych artykułach w głównej mierze odnosił się do konkretnych studiów przypadków i prezentował np. rozwiązania urządzeń funkcjonujących, które nosi klient, współpracujących w ramach Internetu Rzeczy czy też robotów wspomagających codzienne życie człowieka. Ewidentnie kontekst beneficjenta ukierunkowany był na identyfikację jego potrzeb i ich zaspokajanie przez konkretne rozwiązania projektowe. W analizowanym przeglądzie literatury w pewnym stopniu brakuje badań dotyczących konieczności zmiany zachowań konsumentów na skutek nowo projektowanych wyrobów, w kierunku realizacji celów zrównoważonego rozwoju i gospodarki opartej na obiegu zamkniętym.

W literaturze poruszany był także aspekt otoczenia organizacji w kontekście PD, odnoszący się w głównej mierze do celów zrównoważonego rozwoju, uwarunkowań funkcjonowania przedsiębiorstw w obliczu wykorzystania zielonych strategii oraz stosowania technologii I 4.0 w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym.

W zaprezentowanym przeglądzie literatury, chociaż nie w bezpośredni sposób, można wyodrębnić bariery utrudniające wdrożenie prezentowanych rozwiązań środowiskowych i technologicznych do procesów PD oraz samych produktów. Można je rozpatrywać w wymienionych już wcześniej kategoriach, tzn.: organizacji, klientów oraz otoczenia, w którym funkcjonują zarówno te organizacje, jak i klienci. Do przeszkód leżących po stronie przedsiębiorstw zalicza się m.in.:

- przestarzałe modele biznesowe bazujące wyłącznie na zysku jako kluczowym elemencie funkcjonowania przedsiębiorstw,
- konieczność posiadania i wykorzystywania wielodyscyplinarnej wiedzy przez działy R&D&I, co często wiąże się z wydłużaniem czasu trwania wstępnych faz projektów (pomocna może być tutaj sztuczna inteligencja),
- niedobór wszechstronnie wykształconych pracowników posiadających umiejętności łączenia obszarów klienta, organizacji i otoczenia (potwierdzają to



także wyniki badań literaturowych, w których dominują artykuły prezentujące konkretne rozwiązania, a nie tworzące całościowe modele).

Do barier związanych z klientami można zaliczyć m.in.:

- brak świadomości wynikający z braku lub częściowego braku edukacji na temat zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym wśród młodzieży i dorosłych,
- niewłaściwe nawyki konsumenckie (konsumpcjonizm), dające klientom dużą strefę komfortu, z której bardzo trudno będzie wyjść podczas użytkowania zielonych produktów obarczonych szeregiem „niewygodnych” zasad, np. samodzielnego demontażu produktu w fazie EoL przy użyciu instrukcji demontażu,
- lekceważenie kwestii środowiskowych jako ważnego czynnika branego pod uwagę w procesach nabywczych beneficjentów.

Bariery, które osadzone zostały w otoczeniu organizacji oraz klientów, to:

- szum informacyjny i brak jednoznacznej, globalnej polityki informacyjnej związanej ze zrównoważonym rozwojem i gospodarką o obiegu zamkniętym,
- brak wyraźnych ruchów społecznych, których intencją byłaby szybka zmiana dotychczasowego funkcjonowania modeli biznesowych,
- brak systematycznego kształcenia oraz konkretnych systemów edukacji, ukierunkowanych na wiedzę ogólnokształcącą, które pozwalałoby formować przyszłych projektantów jako osoby rozumiejące pozaorganizacyjne konteksty projektowanych produktów.

Praca posiada też swoje ograniczenia wynikające z konieczności syntetyzowania badań oraz prezentowanych treści. Zaprezentowane słowa kluczowe powinny zostać poszerzone o większy zakres i to zarówno w kontekście środowiskowym (np. eko-projekt – *Ecodesign*) czy też w aspekcie poszerzenia wdrażanych w PD technologii I 4.0, takich jak bliźniaki cyfrowe ( $DT_w$ ), wytwarzanie addytywne (AM) czy też autonomiczne pojazdy (*Autonomic Vehicle* – AV). Pomimo to wydaje się, że monografia stanowi dobry punkt wyjścia do tworzenia nowych paradygmatów mających zmieniać świat biznesu na rzecz zrównoważonego rozwoju przy wykorzystaniu najnowszych technologii.

Kluczowym elementem opracowania jest zaprezentowanie koncepcji modelu projektowania wspomagającego doskonałość, uwzględniającego zagadnienia zarówno Industry 4.0, jak i środowiskowych aspektów zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Całość modelu pokazująca cyfrowe i fizyczne oblicze projektowania produktu bazuje na logistyce odwrotnej oraz łańcuchach dostaw o obiegu zamkniętym. Sama koncepcja implikuje także wyzwania związane z projektowaniem produktów DfX 4.0 oraz wskazuje wybrane luki badawcze.

Jak widać, wyzwania stojące przed nową ideą projektowania DfX 4.0 są złożone i skomplikowane. Łączą one nie tylko pojawiające się pomysły i koncepcje, ale także szereg negatywnych kwestii, które stały się „dorobkiem” obecnych społeczeństw. Bez porzucenia pewnych przyzwyczajeń, bez zmiany obowiązujących paradygmatów biznesowych przedsiębiorstwa nie wydadzą się ze strefy komfortu, w której C/T/Q

stanowią główny klucz konkurencyjny. W koncepcji DfX 4.0 potrzeba szerszego, globalnego spojrzenia na kwestię projektowania wyrobów. Wymaga to edukacji zarówno zatrudnionych w przemyśle pracowników wszystkich szczebli, jak i szerokiego grona konsumentów. Należy mieć nadzieję, że przedstawione opracowanie w jakimś stopniu nakłoni przemysł i świat nauki do przemysłów oraz zmiany dotychczasowych standardów funkcjonowania przedsiębiorstw.



# Bibliografia

- Aeknarajindawat N., Jermstittiparsert K., *The Mediating Role of Green Creativity in The Relationship between Proactive Green Innovation, Reactive Green Innovation and The Performance of Green Product Development: A Case of Thai Sports Manufacturing Firms*, „Journal of Human Sport and Exercise, Supplementary Issue: Summer Conferences of Sports Science. First International Conference in Iraq on Sport for Peace” 2019, vol. 14.
- Ahmen M., Sanin C., Szczerbicki E., *Smart Virtual Product Development (SVPD) to Enhance Product Manufacturing in Industry 4.0*, „Proceedings, Procedia Computer Science” 2019, vol. 159.
- Ahmen M., Majeed F., Sanin C., Szczerbicki E., *Enhancing Product Manufacturing through Smart Virtual Product Development (SVPD) for Industry 4.0*, „Cybernetics and Systems” 2020, vol. 51(2).
- Ahmen M., Shafiq S., Sanin C., Szczerbicki E., *Towards Experience-Based Smart Product Design for Industry 4.0*, „Cybernetics, and Systems: An International Journal” 2019, vol. 50(2).
- Ai X., Jiang Z., Zhang H., Wang Y., *Low-carbon Product Conceptual Design from The Perspectives of Technical System and Human Use*, „Journal of Cleaner Production” 2020, vol. 244.
- Akbari M., Do T., *A Systematic Review of Machine Learning in Logistics and Supply Chain Management: Current Trends and Future Directions*, „Benchmarking: An International Journal” 2021, vol. 28(10).
- Al Jahwari L., Garaj V., Harrison D., *Embedding Immersive Technologies into Product Design Education: Students' Awareness of Virtual Reality as A Tool to Support the Development of Design Solutions*, Proceedings, 24<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Product Design Education: Disrupt, Innovate, Regenerate and Transform, E and PDE 2022, EPDE2022/1107, London, Great Britain 2022.
- Aldoy N., Evans M., *A Review of Digital Industrial and Product Design Methods in UK Higher Education*, „The Design Journal” 2011, vol. 14(3).
- Alonso-Garcia M., de-Cozar-Macias O., Blazquez-Parra E., *Viability of Competencies, Skills and Knowledge Acquired by Industrial Design Students*, „International Journal of Technology and Design Education” 2021, vol. 31.

- Altszuller H., *Algorytm wynalazku*, Warszawa 1975.
- Ameri F., Dutta D., *Product Lifecycle Management: Closing the Knowledge Loops*, „Computer-Aided Design and Applications” 2005, vol. 2(5).
- Amin S., Zhang G., Eldali M., *A Review of Closed-loop Supply Chain Models*, „Journal of Data, Information and Management, Springer Nature Switzerland AG” 2020, vol. 2.
- Andreoletti D., Luceri L., Petenier A., Leidi T., Giordano S., *The Virtual Emotion Loop: Towards Emotion-Driven Product Design via Virtual Reality*, [w:] E. Ziemba, W. Chmielarz (red.), *Information Technology for Management: Business and Social Issues*, Lecture Notes in Business Information Processing, LNBIP 2021, vol. 442.
- Anthes C., Garcia-Hernandez R., Wiedemann M., Kranzlmüller D., *State of the Art of Virtual Reality Technology*, Conference Proceedings, IEEE Aerospace Conference: Big Sky, Montana, USA 2016.
- Aphirakmethawong J., Yang E., Mehnen J., *An Overview of Artificial Intelligence in Product Design for Smart Manufacturing*, Proceedings, 27<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing: Smart Systems and Manufacturing, ICAC, Bristol, Great Britain 2022.
- Babu B., Durai Prabhakaran R., Agrawal V., *DFX Analysis Applied to Composite Products*, „Journal of Reinforced Plastics and Composites” 2008, vol. 27(3).
- Backhaus K., Jasper J., Westhoff K., Gausemeier J., Grafe M., Stocklein J., *Virtual Reality Based Conjoint Analysis for Early Customer Integration in Industrial Product Development*, „Procedia CIRP” 2014, vol. 25.
- Bai Z., Mu L., Lin H., *Green Product Design Based on The BioTRIZ Multi-Contradiction Resolution Method*, „Sustainability” 2020, vol. 12(10).
- Balzerkiewitz H., Stechert C., *Product Development Methods in Virtual Reality*, „Proceedings of the Design Society” 2021, vol. 1(ICED21).
- Baltzerkiewitz H., Stechert C., *Use of Virtual Reality in Product Development by Distributed Teams*, Procedia CRIP, 30<sup>th</sup> CRIP Design 2020, Pretoria, RPA 2020, vol. 91.
- Barbosa G., Carvalho J., *Analytical Model for Aircraft Design Based on Design for Excellence (DFX) Concepts and Use of Composite Material Oriented to Automated Processes*, „International Journal Advance Manufacturing Technology” 2013, vol. 69.
- Battaia O., Dolgui A., Sunderesh S., Meerkov S., Tiwari M., *Design for Manufacturing and Assembly/Disassembly: Joint Design of Products and Production Systems*, „International Journal of Production Research” 2018, vol. 56(24).
- Batwara A., Sharma V., Makkar M., Giallanza A., *An Empirical Investigation of Green Product Design and Development Strategies for Eco Industries Using Kano Model and Fuzzy AHP*, „Sustainability” 2022, vol. 14(8735).
- Becker J., Wits W., *A template for design for excellence (DfX) Methods*, Proceeding, 23<sup>rd</sup> CRIP Design Conference, Bochum, Deutschland 2013.

- Benabdellah A., Zekhnini K., *Sustainable Product Development: The Intersection of Design for X, Big Data, and Industrial Internet of Things with Fuzzy Logic Theory*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Transportation and Smart Technologies, TST, Tanger, Morocco 2021.
- Benabdellah A., Zekhnini K., Cherrafi A., Garza-Reyes J., Kumar A., *Design for the Environment: An Ontology Based Knowledge Management Model for Green Product Development*, „Business Strategy and The Environment” 2021, vol. 30(8).
- Beng L., Omar B., *Integrating Axiomatic Design Principles into Sustainable Product Development*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology” 2014, vol. 1(2).
- Bentaha M., Dolgui A., Battaïa O., Riggs R., Hu J., *Profit-Oriented Partial Disassembly Line Design: Dealing with Hazardous Parts and Task Processing Times Uncertainty*, „International Journal of Production Research” 2018, vol. 56(24).
- Berg L., Vance J., *Industry Use of Virtual Reality in Product Design and Manufacturing: A Survey*, „Virtual Reality” 2017, vol. 21(1).
- Berni A., Borgianni Y., *Applications of Virtual Reality in Engineering and Product Design: Why, What, How, When and Where*, „Electronics” 2020, vol. 9(1064).
- Bhatt P., Muduli A., *Artificial Intelligence in Learning and Development: A Systematic Literature Review*, „European Journal of Training and Development” 2023, vol. 47, No. 7/8.
- Bi C., Wang H., Cao W., *Research on the Service for the Disabled in Interior Design and Product Design Based on Artificial Intelligence*, Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference on Artificial Intelligence in China, 871 LNEE, Changbaishan, China 2023.
- Biancolin M., Capoani L., Rotaris L., *Reverse Logistics and Circular Economy: A Literature Review*, „European Transport” 2023, Issue 94(7).
- Bielecki M., *Projektowanie wspomagające logistykę, Design for Logistics*, Łódź 2018.
- Bitzer M., Eigner M., Faißt K.-G., Muggeo C.M., Eickhoff T., *Framework of the Evolution in Virtual Product Modelling and Model Management towards Digitized Engineering*, Proceedings, 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17), Vancouver, Canada 2017.
- Bogue R., *Design for Disassembly: A Critical Twenty-First Century Discipline*, „Assembly Automation” 2007, vol. 27(4).
- Boks C., Stevels A., *Essential Perspectives for Design for Environment, Experiences from the Electronics Industry*, „International Journal of Production Research” 2007, vol. 45(18–19).
- Booth A., Sutton A., Papaioannou D., *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, Los Angeles 2012.
- Boothroyd G., *Product Design for Manufacture and Assembly*, „Computer Aided Design” 1994, vol. 26, No. 7.
- Boothroyd G., Alting L., *Design for Assembly and Disassembly*, „CIRP Annals – Manufacturing Technology” 1992, vol. 41(2).

- Boothroyd G., Dewhurst P., *Product Design and Assembly*, Amherst 1983.
- Bralla J., *Design for eXcellence*, New York 2006.
- Bralla J., *Design for Manufacturability Handbook*, New York 1998.
- Brasse J., Broder H., Forster M., Klier M., Sigler I., *Explainable Artificial Intelligence in Information Systems: A Review of the Status Quo and Future Research Directions*, „Electronic Markets” 2023, vol. 33(26).
- Buchert T., Stark R., *Integration of Sustainability Targets into the Product Creation Process of German Manufacturing Companies*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019.
- Byukusenge E., Munene J., *Knowledge Management and Business Performance: Does Innovation Matter?*, „Cogent Business & Management” 2017, vol. 4(1).
- Cao H., Folan P., *Product Life Cycle: The Evolution of a Paradigm and Literature Review from 1950–2009*, „Production Planning and Control” 2011, vol. 23(8).
- Chaudhary A., Sudzina F., Mikkelsen B., *Promoting Healthy Eating among Young People – A Review of the Evidence of the Impact of School-Based Interventions*, „Nutrients” 2020, vol. 12(2894).
- Cipresso P., Giglioli I., Raya M., Riva G., *The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature*, „Frontiers in Psychology” 2018, vol. 9, Article 2086.
- Cox W., *Product Life Cycles as Marketing Models*, „The Journal of Business” 1967, vol. 40, No. 4.
- Coutinho R., Ceryno P., Campos L., Bouzon M., *A Critical Review on Lean Green Product Development: State of Art and Proposed Conceptual Framework*, „Environmental Engineering and Management Journal” 2019, vol. 18(11).
- Czakon W., *Metodyka systematycznego przeglądu literatury*, „Przegląd Organizacji” 2011, nr 3(854).
- Darlington J., Booker J., *Concept Design for Fatigue Resistance*, „Journal of Engineering Design” 2010, vol. 21(5).
- Das S., Datla V., Samir G., *DFQM – An Approach for Improving the Quality of Assembled Products*, „International Journal of Production Research” 2000, vol. 38(2).
- Dixen M., Diers D., Wingert B., Hatzipanayioti A., Mohler B., Riedel O., Bues M., *Distributed, Collaborative Virtual Reality Application for Product Development with Simple Avatar Calibration Method*, Conference Proceedings, 26<sup>th</sup> IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR, Osaka, Japan 2019.
- Dreyfuss H., *Designing for People*, New York 1955.
- Duhovnik J., Sterbek M., Prasad B., *Development of New Products in Small Company*, „Concurrent Engineering Research and Application” 2001, vol. 9(3).
- Durlik I., *Inżynieria zarządzania*, Katowice 1993.
- Dwivedi S., Sobolewski M., *Concurrent Engineering – An Introduction*, CERC Technical Reports Series, Technical Memoranda, CERC-TR-TM-90-006, West Virginia, USA 1990.



- Elkington J., *Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development*, „California Management Review” 1994, vol. 36.
- Feyzioglu O., Buyukozkan G., *Evaluation of New Product Development Projects Using Artificial Intelligence and Fuzzy Logic*, „Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology” 2006, vol. 11.
- Frederico G., Garza-Reyes J., Anosike A., Kumar V., *Supply Chain 4.0: Concepts, Maturity and Research Agenda*, „Supply Chain Management: An International Journal” 2019, vol. 25(2).
- Gacovski Z. (red.), *Internet of Things*, ArclerPress, Oakville 2019.
- Garvin D., *What Does 'Product Quality' Really Mean?*, „Sloan Management Review” 1984, vol. 26, No. 1.
- Gay A., Samar L., *El diseño Industrial en la Historia*, Córdoba 1994.
- General Electric, *Manufacturing Producibility Handbook*, General Electric Co., New York 1960.
- Gerschütz B., Goetz S., Wartzack S., *AI4PD – Towards a Standardized Interconnection of Artificial Intelligence Methods with Product Development Processes*, „Applied Science” 2023, vol. 13(3002).
- Ghoreishi M., Happonen A., *New Promises AI Brings into Circular Economy Accelerated Product Design: A Review on Supporting Literature*, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on Environment Pollution and Prevention 2019 & E3S Web of Conferences, vol. 158, ICEPP, 2020.
- Giuggioli G., Pellegrini M., *Artificial Intelligence as an Enabler for Entrepreneurs: A Systematic Literature Review and an Agenda for Future Research*, „International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research” 2023, vol. 29, No. 4.
- Goldens B., *A History of Design for Manufacturing and Assembly*, „Machine Design” 2022, vol. 94(2).
- Goldratt E., Fox J., *Cel I. Doskonałość w produkcji*, Warszawa 2000.
- Gould R., Bratt C., Mesquita P., Broman G., *Integrating Sustainable Development and Design-Thinking-Based Product Design*, [w:] A. Hu, M. Matsumoto, Ch. Kuo, S. Smith (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019.
- Górski F., Buń P., Wichniarek R., Zawadzki P., Hamrol A., *Design and Implementation of a Complex Virtual Reality System for Product Design with Active Participation of End User*, International Conference on Human Factors, Software, and Systems Engineering, AHFE 2016, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, AISC, vol. 492.
- Guide Jr. V., Li J., *The Potential for Cannibalization of New Products Sales by Remanufactured Products*, „Decision Science Journal” 2010, vol. 41(3).
- Gullo L., Dixon J. (red.), *Design for Maintainability*, West Sussex 2021.
- Guo L., Chen B., *The Industrial Product Design Service System Based on the Sustainable Development of the Internet of Things*, „Mobile Information Systems” 2022, vol. 2022, Art. ID. 4623301.

- Happonen A., Ghoreishi M., *Key Enablers for Deploying Artificial Intelligence for Circular Economy Embracing Sustainable Product Design: Three Case Studies*, Proceedings, Conference Paper in AIP Conference Proceedings Selangor Darul Ehsan, Malaysia 2019.
- Hariri-Ardebili M., Mahdavi G., Nuss L., Lall U., *The Role of Artificial Intelligence and Digital Technologies in Dam Engineering: Narrative Review and Outlook*, „Engineering Applications of Artificial Intelligence” 2023, vol. 126(5).
- He W., Li W., *Research on Green Product Design and Sustainable Development*, „Advances in Economics, Business and Management Research” 2017, vol. 48.
- Heisig P., *Harmonisation of Knowledge Management – Comparing 160 KM Frameworks around the Globe*, „Journal of Knowledge Management” 2009, vol. 13(4).
- Heisig P., Orth R., *Knowledge Management Frameworks. An International Comparative Study*, Berlin 2007.
- van Hensbergen G., *Biografia. Gaudi – Geniusz z Barcelony*, Warszawa 2015.
- Hernandez-Jaimes M., Martinez-Cruz A., Ramírez-Gutiérrez K., Feregrino-Urbe C., *Artificial Intelligence for IoMT Security: A Review of Intrusion Detection Systems, Attacks, Datasets and Cloud-Fog-Edge Architectures*, „Internet of Things (Netherlands)” 2023, vol. 23.
- Holt R., Barnes C., *Towards an Integrated Approach to „Design for X”: An Agenda for Decision Based DFX Research*, „Research in Engineering Design” 2009, vol. 21(2).
- Holzbaur U., *Sustainable Development and Product Development – Friend or Foe?*, „Journal for New Generation Sciences” 2010, vol. 8(3).
- Housel T., Bell A., *Measuring and Managing Knowledge*, New York 2001.
- Hu A., Matsumoto M., Kuo Ch., Smith S. (red.), *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability I: Eco Design of Products and Services*, Singapore 2019.
- Hu R., Chen H., *Application of Virtual Reality Technology in Industrial Creative Product Design*, *International Conference on Communications, Electronic Technology and Computer Engineering*, CETCE 2021, „Journal of Physics: Conference Series” 1992, vol. 022016(2).
- Huang Ch-Ch., Liang W-Y., Yi S-R., *Cloud-Based Design for Disassembly to Create Environmentally Friendly Products*, „Journal of Intelligence Manufacturing” 2017, vol. 28.
- Huang G.Q., *Design for X. Concurrent Engineering Imperatives*, Springer – Science + Business Media, Netherlands 1996.
- Huang Z., Jowers C., Kent D., Dehghan-Manshadi A., Dargusch M., *The Implementation of Industry 4.0 in Manufacturing: From Lean Manufacturing to Product Design*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2022, vol. 121(5–6).
- Jaiswal A., Basu R., Bhola P., *Proposed Decision Framework for Smart Product Development in Industry 4.0: An Indian Perspective*, Proceedings, 6<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision, and Information Technologies (CoDIT’19), Paris, France 2019.

- Jasti N., Sharma A., Karinka S., *Development of a Framework for Green Product Development*, „Benchmarking-An International Journal” 2015, vol. 22(3).
- Johnson G., Fisher M., Salmon J., Mattson C., *Product Development Using Perceived Correlations between The United Nations Sustainable Development Goals and Social Impact Categories*, Proceedings 26<sup>th</sup> Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, DFMLC 2021, Held as Part of the ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC-CIE, New York, USA 2021.
- Johansson G., Sundin E., *Lean and Green Product Development: Two Sides of The Same Coin?*, „Journal of Cleaner Production” 2014, vol. 85.
- Kaljun J., Dolsak B., *Artificial Intelligence in Aesthetic and Ergonomic Product Design Process*, Proceedings, 34<sup>th</sup> International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO, Opatija, Croatia 2011.
- Karakoylu P., Kural A., Gulden S., *The Effect of Artificial Intelligence (AI) on New Product Development (NPD): A Future Scenario*, Proceedings, 5<sup>th</sup> World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, WMCAUS 2020, IOP Conference Series: Materials and Engineering (960), Prague, Czech Republic 2020.
- Kasarda M., Terpenney J., Inman D., Precoda K., Jelesko J., Sahin A., Park J., *Design for Adaptability (DFAD) – a New Concept for Achieving Sustainable Design*, „Robotics and Computer-Integrated Manufacturing” 2007, vol. 23(6).
- Khan A., Laalaoui W., Hokal F., Tareq M., Ahmad L., *Connecting Reverse Logistics with Circular Economy in the Context of Industry 4.0*, „Kybernetes” 2023, vol. 52(12).
- Kim J., Sul S., Choi J., *Development of User Customized Smart Keyboard Using Smart Product Design-Finite Element Analysis Process in the Internet of Things*, „ISA Transaction: The Journal of Automation” 2018, vol. 81.
- Kiritsis D., Bufardi A., Xirouchakis P., *Research Issues on Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems*, „Advanced Engineering Informatics” 2003, vol. 17.
- Komischke T., *Human-Centred Artificial Intelligence Considerations and Implementations: A Case Study from Software Product Development*, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Conference on Human-Computer Interaction, HCI 2021, Washington, USA 2021.
- Legardeur J., Merlo C., Fischer X., *An Integrated Information System for Product Design Assistance Based on Artificial Intelligence and Collaborative Tools*, „International Journal of Product Lifecycle Management” 2006, vol. 1(3).
- Levitt T., *Exploit the Product Life Cycle*, „Harvard Business Review” 1965, vol. 11–12.
- Levy Y., Ellis T., *A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research*, „Informing Science” 2006, vol. 9.

- Li B., *Application of Artificial Intelligence in Electronic Product Design*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE 2021, London, Great Britain 2021.
- Li Y., Guan Z., *Development and Prospect of Computer Aided Engineering*, Proceedings, 11<sup>th</sup> International Conference of Information and Communication Technology (ICTech), Wuhan, China 2022.
- Liu W., Bo H., *Application of Artificial Intelligence Technology in Wearable Product Design*, Proceedings, International Conference on Innovation Design and Digital Technology, ICIDDT 2020, Zhenjing, China 2020.
- Liu Y., He S., Liu W., Chen X., *A Design Optimization Method with Sparse Scattered Data and Evolutionary Computation*, Hindawi, „Journal of Nanomaterials” 2022, vol. 2022.
- Loganathan G., *Agility through Product Design in The Era of Industry 4.0*, „International Journal of Early Childhood Special Education” 2022, vol. 14(02).
- Luan N., Hau D., Thu N., *The Influence of Green Product Development Performance to Enhance Enterprise Effectiveness and Innovation*, „Economies” 2022, vol. 10(113).
- Mainzer K., *From Augmented Reality to the Internet of Things: Paradigm Shift in Digital Innovation Dynamics*, [w:] J. Ariso, *Augmented Reality: Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation*, Berlin–Boston 2017.
- Majmundar M., Ansari Z., *Design for Disassembly to Attain Sustainability: Analyzing the Past and Proposing Further Research Opportunities*, „The IUP Journal of Supply Chain Management” 2018, vol. XV(2).
- Maldonado T., *Diseño Industrial reconsiderado*, Barcelona 1993.
- Marcopoulos E., Gann E., *Bilateral Knowledge-Sharing for New Product Development Under the UN Sustainable Development Goals*, Proceedings, Entrepreneurship and Communication of Design, AHFE 2021, vol. 276.
- Masui K., Sakao T., Inaba A., *Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1<sup>st</sup> report) a Methodology in Early Stage of DfE*, Proceedings, The IEEE Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan 2001.
- Mbang S., Haasis S., *Automation of the Computer-Aided Design-Computer-Aided Quality Assurance Process Chain in Car Body Engineering*, „International Journal of Production Research” 2004, vol. 42, No. 17.
- Menon U., Graham M., *Concurrent Engineering: Effective Deployments Strategies*, „BeloHorizonte” 1996, vol. 6(2).
- Mesa J., Esparragoza I., Maury H., *Trends and Perspectives of Sustainable Product Design for Open Architecture Products: Facing the Circular Economy Model*, „International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology” 2019, vol. 6(2).
- Mestre A., Cooper T., *Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy*, „Design Journal” 2017, vol. 20.

- Minciu M., Berar F., Dobrea R., *The Challenges of the VUCA World in the Development of Sustainable Investment Projects*, „Management and Economics Review” 2020, vol. 6, Issue 2.
- Mouelhi O., Couturier P., Redarce T., *An Artificial Intelligence Approach for The Multicriteria Optimization in Mechatronic Products Design*, Proceedings, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA Jilin, China 2009.
- Mühlhäuser M., *Constructing Ambient Intelligence*, Darmstadt 2007.
- Naeem H., Di Maria E., *Customer Participation in New Product Development: An Industry 4.0 Perspective*, „European Journal of Innovation Management” 2020, vol. 25(6).
- Nascimento J., Cessa A., *Use of Industry 4.0 Concepts to Use the „Voice of the Product” in the Product Development Process in the Automotive Industry*, *Product Lifecycle Management*, „The Case Studies” 2019, vol. 4.
- National Academy of Engineering US, *The engineer of 2020: Visions of engineering in the New Century*, Washington 2004.
- Neerugatti V., Baseer K., Jahir Pasha M., Satish Kumar V., *Internet of Things: A Product Development Cycle for The Entrepreneurs*, „HELIX” 2020, vol. 10(2).
- Ng C., Tang W., *Evaluation of Design Options for Green Product Development: A Combined Cuckoo Search and Life Cycle Assessment Approach*, „International Journal of Life Cycle Assessment” 2022, vol. 27(5).
- Nozaki N., Konno E., Sato M., Sakairi M., Sihuya T., Kanazawa Y., Georgescu S., *Application of Artificial Intelligence Technology in Product Design*, „Fujitsu Scientific and Technical Journal” 2017, vol. 53(4).
- Nunes M., Pereira A., Alves A., *Smart Products Development Approaches for Industry 4.0*, „Procedia Manufacturing” 2017, vol. 13.
- Orwell G., *Rok 1984*, Warszawa 2013.
- Pai R., Shetty A., Shetty A., Bhandary R., Shetty J., Nayak S., Dinesh T., D’souza K., *Integrating Artificial Intelligence for Knowledge Management Systems – Synergy among People and Technology: A Systematic Review of The Evidence*, „Economic Research-Ekonomska Istraživanja” 2022, vol. 35, No. 1.
- Palsodkar M., Yadav G., Nagare M., *Integrating Industry 4.0, and Agile New Product Development Practices to Evaluate the Penetration of Sustainable Development Goals in Manufacturing Industries*, „Journal of Engineering Design and Technology” 2023, vol. 22(4).
- Patel A., Kethavath A., Kethavath N., Naorem A., Jagadale M., Sheetal K., Renjith P., *Review of Artificial Intelligence, and Internet Ofthings Technologies in Land and Water Management Research During 1991–2021: A Bibliometric Analysis*, „Engineering Applications of Artificial Intelligence” 2023, vol. 123.
- Patil A., Kulkarni M., Rao P., *New Product Development (NPD) Process in the Context of Industry 4.0*, Proceedings, IEEE IEEM 2019 Macau, China 2019.



- Pigosso D., McAloone T., Rozenfeld H., *Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation*, „Journal of Indian Institute of Science” 2016, vol. 95.
- Pinzon Chica R., Lascano S., Maury-Ramirez H., *Design for Manufacturing and Assembly and CAE Tools: The Case of a Rice Husker*, „Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International DAAAM Symposium” 2011, vol. 22(1).
- Pirinen A., *The Barriers, and Enablers of Co-design for Services*, „International Journal of Design” 2016, vol. 10(3).
- The Platform for Accelerating the Circular Economy, *Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the Circular Economy Consumer Electronics and Plastics Packaging*, PACE, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2019, [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Harnessing\\_4IR\\_Circular\\_Economy\\_report\\_2018.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_4IR_Circular_Economy_report_2018.pdf) [dostęp: 12.09.2024].
- Polli R., Cook V., *Validity of the Product Life Cycle*, „The Journal of Business” 1969, vol. 42, No. 4.
- Porter M., *Przewaga konkurencyjna. Osiąganie i utrzymywanie lepszych wyników*, Gliwice 2006.
- Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijer A., *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*, The Hague 2017.
- Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (red.), *Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Great Britain 2022.
- Prajapati D., Kumar M., Pratap S., Chelladurai H., Zuhair M., *Sustainable Logistics Network Design for Delivery Operations with Time Horizons in B2B E-Commerce Platform*, „Logistics” 2021, vol. 5(61).
- Purdy T., Choi Y., *Enhancing Augmented Reality for Use in Product Design*, Proceedings, Conference on Human Factors in Computing Systems, Toronto, Canada 2014.
- Rahman M., Ghosh T., Auma N., Kaiser M., Anannya M., Hosen A., *Machine Learning, and Internet of Things in Industry 4.0: A Review*, „Measurement: Sensors” 2023, vol. 28.
- Rao S., Nahm A., Shi Z., Deng X., Syamil A., *Artificial Intelligence and Expert Systems Applications in New Product Development – a Survey*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 1999, vol. 10(3).
- Rath C., Baral S., Singh T., Goel R., *Role of Artificial Intelligence and Machine Learning in Product Design and Manufacturing*, Proceedings International Mobile and Embedded Technology Conference, MECON, Noida, India 2022.

- Ren C., Cai C., *Sustainability of Green Product Design Teaching and Research*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Social Science, Humanities, and Management (ASSHM 2014), Guangzhou, China 2014.
- Riou A., Mascle Ch., *Assisting Designer Using Feature Modeling for Lifecycle*, „Computer-Aided Design” 2009, vol. 41, Issue 12.
- Roberts M., Sallen S., Clarke J., Searle J., Coley D., *Understanding the Global Warming Potential of Circular Design Strategies: Life Cycle Assessment F A Design-for-Disassembly Building*, „Sustainable Production and Consumption” 2023, vol. 37.
- Rogers D., Tibben-Lembke R., *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reno 1998.
- Rosario A., Dias J., *How Industry 4.0 and Sensors Can Leverage Product Design: Opportunities and Challenges*, „Sensors” 2023, vol. 23(3).
- Rossi M., Cappelletti F., Germani M., *Design for Environmental Sustainability: Collect and Use Company Information to Design Green Products*, Proceedings, Procedia CIRP Life Cycle Engineering Conference 2022, vol. 105.
- Rowland R., *Designing for Excellence*, „Journal of Surface Mount Technology” 1997, vol. 11(10).
- Rowley J., Slack F., *Conducting a Literature Review*, „Management Research News” 2004, vol. 27(6).
- Sallati C., de Andrade Betazzi J., Schutzer K., *Professional Skills in The Product Development Process: The Contribution of Learning Environments to Professional Skills in The Industry 4.0 Scenario*, Proceedings, 29<sup>th</sup> CIRP Design Conference 2019, Procedia CIRP 84, Povia de Varzim, Portugal 2019.
- Santhos S., Lawrence L., *Understanding the Implementations and Limitations in Knowledge Management and Knowledge Sharing Using a Systematic Literature Review*, „Current Psychology” 2023, vol. 42.
- Sawhney G., *Concurrent Engineering*, University Science Press, New Delhi 2018.
- Schneider D., Frohlich T., Huth T., Vietor T., *Design for Flexibility – Evaluation Interactions between Product Properties and Production Processes*, „Proceedings, Procedia CIRP” 2020, vol. 91.
- Schweitzer G., Bitzer M., Vielhaber M., *Artificial Intelligence in Engineering: Evolution of Virtual Product Development in The Context of Medical Device Industry*, Proceedings, 31<sup>st</sup> CIRP Design Conference, Twente, Netherlands 2021.
- Shang M., *Artificial Intelligence Product Design Evaluation Method*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE, Hangzhou, China 2010.
- Shi Z., Nahm A., Rao S., *New Product Development: Stages, Core Elements, and Artificial Intelligence – A Conceptual Model*, Proceeding, Decision Science Institute, Las Vegas, USA 1998.
- Shuaib M., Seevers D., Zhang X., Badurdeen F., Rouch K., Jawahir IS., *Product Sustainability Index (ProdSI)*, „Journal Industry Ecological” 2014, vol. 18(4).



- Singh P., *Systematic Review of Data-Centric Approaches in Artificial Intelligence and Machine Learning*, „Data Science and Management” 2023, vol. 6.
- Spreafico C., Landi D., *Using Product Design Strategies to Implement Circular Economy: Differences between Students and Professional Designers*, „Sustainability” 2022, vol. 14(1122).
- Sudarson A., Kurukkanari Ch., Bendi D., *A State-of-the-art Review on Readiness Assessment Tools in The Adoption of Renewable Energy*, „Environmental Science and Pollution Research” 2023, vol. 30.
- Sutherland I., *The Ultimate Display. Multimedia: From Wagner to Virtual Reality*, New York–Norton 1965.
- Talaba D., Antonya C., Stavar A., Georgescu V., *Virtual Reality in Product Design and Robotics*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom, 2011, Conference Proceedings, Budapest, Hungary 2011.
- Tavcar J., Demsar I., Varl M., *Knowledge Management Support of Engineering Change Management and Adaptive Design in Serial and One-Of-A-Kind Production*, [w:] T. Graham (red.), *Knowledge Management: Progres, Trends and Challenges*, New York 2019.
- Taylor A., *Design-bites: Art and Engineering in Product Design, Design for Maintainability Principles*, „Modularity and Rules” 2007, [https://www.design1st.com/Design-Resource-Library/design\\_tips/Design\\_for\\_Maintainability.pdf](https://www.design1st.com/Design-Resource-Library/design_tips/Design_for_Maintainability.pdf) [dostęp: 12.09.2024].
- Tian Y., *Green Product Design Based on Fuzzy Hierarchy Evaluation, Green Product Design Based on Fuzzy Hierarchy Evaluation*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology, Hangzhou, China 2016.
- Tibben-Lembke R., *Life after Death: Reverse Logistics and The Product Life Cycle*, „International Journal of Physical Distribution & Logistics Management” 2002, vol. 32, No. 3.
- Twenge M., *iGen*, Sopot 2019.
- Urban W., Lukaszewicz K., Krawczyk-Dembicka E., *Application of Industry 4.0 to the Product Development Process in Project-Type Production*, „Energies” 2020, vol. 13(21).
- Ulrich K., Eppinger S., *Product Desing and Developmentm*, 5<sup>th</sup> ed., New York 2012.
- Wagner R., Schleich B., Haefner B., Kuhnle A., Wartzak S., Lanza G., *Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products*, Proceedings, 29<sup>th</sup> CIRP Design Conference 2019, Procedia CIRP 84, Povoá de Varzim, Portugal 2019.
- Wallat P., Lawrenz S., Lohrengel A., *A Knowledge-based Product Design Assistance for the Advanced Circular Economy*, Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Stuttgart, Deutschland 2021.
- Wan X., *Research on Business Data Management System of Cultural and Creative Product Design and Development based on Artificial Intelligence Algorithm*,

- Proceedings – 2022 International Conference on Information System, Computing and Educational Technology, ICISCET, New York, USA 2022.
- Wang H., An N., Ma S., *Innovative Methods for the Integration of Marketing Concepts and Art Design in Product Design in the Era of Internet of Things*, „Wireless Communications and Mobile Computing” 2022, vol. 2022.
- Wang J., Ming H., *Reflection of Sustainable Development on Innovative Product Design*, Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference on Product Innovation and Management, Wuhan, China 2010.
- Wang L., Wen X., Abdel-Hafez K., *Design for Testability*, [w:] L. Wang, Ch. Wu, X. Wen (red.), *VLSI Test Principles and Architectures: Design for Testability*, The Morgan Kaufmann Series in Systems on Silicon, Amsterdam 2006.
- Webster J., Watson R.T., *Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review*, „MIS Quarterly” 2002, vol. 26(2).
- Williams J., Colomb G., *The Craft of Argument*, 2<sup>nd</sup> ed., New York 2003.
- Winner R., Pennell J., Bertrand H., Slusarczyk M., *The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition*, IDA Raport R-338, Virginia, USA 1988.
- Wolfe P., Tasse S., *Development of a Quality Assurance Management Information System*, „International Journal of Production Research” 1979, vol. 17.
- Womack J., Jones D., *Lean Thinking, Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, London 1996.
- Womack J., Jones D., *Odchudzanie firm. Eliminacja marnotrawstwa kluczem do sukcesu*, Warszawa 2001.
- Vargova J., Badida M., Hricova B., *Product Design and Sustainable Development in Engineering Process*, Proceedings, Annals of DAAAM & Proceedings, Trnava, Slovakia 2008.
- Xia L., Lin X., *Critical Factors in The Sustainable Development of Product Design for Eco-Innovation and Green Manufacturing*, „Journal of Environmental Protection and Ecology” 2022, vol. 23(4).
- Xiao P., Li G., Yang M., *The Application of Virtual Reality to Product Development of Automobile Parts and Spares*, International Conference on Intelligent Processing Systems – IEEE 1997, Beijing, China 1997.
- Xiao Y., *Application of Neural Network Algorithm in Medical Artificial Intelligence Product Development*, „Computational and Mathematical Methods in Medicine” 2022, vol. 2022.
- Xu L., Qin S., Wang P., Gao J., *Research Review on Artificial Intelligence Technology to Provide Design of Man-Machine Interaction in Industry and Product Design*, Proceedings, 19<sup>th</sup> International Conference Electronic Business, Newcastle Upon Tyne, Great Britain 2019.
- Yerpude S., Singhal T., *Enhancing New Product Development Effectiveness with Internet of Things Origin Real Time Data*, „Journal of Cases on Information Technology” 2018, vol. 20(3).

- Yerpude S., Singhal T., *New Product Development – A Transformational Perspective with Internet of Things*, „International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)” 2019, vol. 8(4C).
- Zawadzki P., Żywicki K., *Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in The Industry 4.0 Concept*, „Management and Production Engineering Review” 2016, vol. 7(3).
- Zengin Y., Naktiyok S., Kaygın E., Kavak O., Topcuoglu E., *An Investigation upon Industry 4.0 and Society 5.0 within the Context of Sustainable Development Goals*, „Sustainability” 2021, vol. 13.
- Zhang H., Huang D., *Critical Success Factors in Sustainable Development of Product Design for Green Environmental Transformation*, „Journal of Environmental Protection and Ecology” 2022, vol. 23(4).
- Zheng H., Feng Y., Gao Y., Tan J., *A Robust Predicted Performance Analysis Approach for Data-Driven Product Development in The Industrial Internet of Things*, „Sensors” 2018, vol. 18(9).
- Zheng J., Feng Y., *Study on The Collaborative Product Design Platform in The Context of The Internet of Things*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet, Yichang, China 2012.
- Zheng J., Yan H-X., *Study on The Construction of Distributed Collaborative Product Design Platform Based on The Internet of Things*, International Conference on Electrical, Information Engineering and Mechatronics, EIEM London–New York 2011.
- Zhou X., *Research on Wearable Intelligent Product Design Based on Internet of Things Technology*, Proceedings, International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics, CSIA, Zurich, Switzerland 2021.
- Zikopoulos C., *On the Effect of Upgradable Products Design on Circular Economy*, „International Journal of Production Economics” 2022, vol. 254.

## Źródła internetowe

- <https://businessmodelnavigator.com/explore> [dostęp: 12.12.2023].
- <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai> [dostęp: 24.04.2024].
- <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-flagship-publications/w/ks-04-23-184> [dostęp: 1.12.2023].
- <https://elearning.przemyslprzyszlosci.gov.pl/slownik-pojec/referencyjny-model-architektury-przemyslu-4-0-rami4-0/> [dostęp: 11.07.2023].
- <https://instytutwzornictwa.com/historia/> [dostęp: 14.04.2023].
- <https://klimat.rp.pl/zwierzeta/art39006251-na-antarktydzie-zginelo-niemal-10-tysiecy-pisklat-pingwinow> [dostęp: 22.09.2023].

- <https://lubimyczytac.pl/cytat/120286> [dostęp: 28.06.2023].
- <https://repair.eu> [dostęp: 21.04.2023].
- <https://stephangrabmeier.de/bani-versus-vuca/> [dostęp: 25.04.2024].
- <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-right-to-repair> [dostęp: 21.04.2023].
- [https://www.ey.com/pl\\_pl/workforce/pokolenie-z-co-to-jest](https://www.ey.com/pl_pl/workforce/pokolenie-z-co-to-jest) [dostęp: 21.09.2023].
- [https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/5-5-predictions-5-innovations-will-help-change-lives-within-next-5-years/?mhsrc=ibmsearch\\_a&mhq=cryptographic%20anchor%20technology](https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/5-5-predictions-5-innovations-will-help-change-lives-within-next-5-years/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=cryptographic%20anchor%20technology) [dostęp: 4.07.2023].
- <https://www.idsa.org/about-idsa/our-story/> [dostęp: 14.03.2023].
- <https://www.iso.org/standard/35736.html> [dostęp: 13.09.2023].
- <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx> [dostęp: 8.09.2023].
- <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21213546/a-history-of-design-for-manufacturing-and-assembly> [dostęp: 5.04.2023].
- <https://www.money.pl/gospodarka/jak-internet-rzeczy-iot-zmienia-dzisiejszy-biznes-6887253651655616a.html> [dostęp: 13.09.2023].
- <https://www.sap.com/poland/products/artificial-intelligence/what-is-machine-learning.html> [dostęp: 4.07.2023].
- <https://www.wwf.pl/zbrodnia-na-odrze-zbrodnia-na-nas-wszystkich> [dostęp: 22.09.2023].



# Spis rysunków

<b>Rysunek 1.</b>	Cykl życia produktu przykładowej branży	26
<b>Rysunek 2.</b>	Fazy cyklu życia produktu wg Tibben-Lembkego	27
<b>Rysunek 3.</b>	Przepływ materiałów i informacji w ramach cyklu życia systemów produktów z wykorzystaniem działań gospodarki o obiegu zamkniętym	30
<b>Rysunek 4.</b>	Ciągłe doskonalenie w cyklu wiedzy	35
<b>Rysunek 5.</b>	Metoda inżynierii sekwencyjnej ( <i>Across-The-Wall</i> )	40
<b>Rysunek 6.</b>	Kolejne etapy zintegrowanego łańcucha procesu CAD-CAQ na przykładzie elementów blacharskich w przemyśle samochodowym	44
<b>Rysunek 7.</b>	Systemy komputerowego wspomagania w kontekście zarządzania cyklem życia produktu na przełomie lat	46
<b>Rysunek 8.</b>	Ewolucja projektowania wspomagającego wytwarzanie i montaż	49
<b>Rysunek 9.</b>	Metoda projektowania wspomagającego wytwarzanie	51
<b>Rysunek 10.</b>	Etapy SE wykorzystujące DFMA	53
<b>Rysunek 11.</b>	Klasyfikacja technik DfX z uwzględnieniem wymiarów zrównoważonego rozwoju	60
<b>Rysunek 12.</b>	Dominujące obszary DfX	67
<b>Rysunek 13.</b>	Kolejne etapy przeglądu literatury metodą STAR	73
<b>Rysunek 14.</b>	Wizualizacja <i>Overlay</i> współautorów publikacji odnoszących się do tematyki PD w kontekście SD	85
<b>Rysunek 15.</b>	Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE	86
<b>Rysunek 16.</b>	Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE	87
<b>Rysunek 17.</b>	Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE	87
<b>Rysunek 18.</b>	Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście Green	88
<b>Rysunek 19.</b>	Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach wszystkich publikacji odnoszących się do PD w kontekście CE, SD, GPD – dwóch autorów	89
<b>Rysunek 20.</b>	Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście Green, CE oraz SD	90
<b>Rysunek 21.</b>	Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0	91
<b>Rysunek 22.</b>	Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście IoT	92

<b>Rysunek 23.</b> Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście VR	93
<b>Rysunek 24.</b> Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście AI	94
<b>Rysunek 25.</b> Największy zestaw połączonych współautorstw w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0, IoT, VR, AI	94
<b>Rysunek 26.</b> Połączenie słów kluczowych w ramach publikacji odnoszących się do PD w kontekście I 4.0, IoT, VR oraz AI.	95
<b>Rysunek 27.</b> Model demokratycznego rozwoju produktu przy współdzieleniu się wiedzą	101
<b>Rysunek 28.</b> Diagram Venna rozkładu aspektów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych w odniesieniu do TBL	103
<b>Rysunek 29.</b> Diagram Venna kryteriów zrównoważonego rozwoju wg Bucherta i Starka	107
<b>Rysunek 30.</b> System wspomagania projektowania produktów oparty na wiedzy	121
<b>Rysunek 31.</b> Technologie przemysłu 4.0 w cyrkularności	123
<b>Rysunek 32.</b> Model architektury referencyjnej 4.0 – RAMI4.0	138
<b>Rysunek 33.</b> Realizacja strategii masowej kastomizacji w inteligentnej fabryce	148
<b>Rysunek 34.</b> Skumulowane koszty cyklu życia produktu z wykorzystaniem VR	155
<b>Rysunek 35.</b> Proces inteligentnego projektowania produktów metodą elementów skończonych (SPD-FEAP)	164
<b>Rysunek 36.</b> Zakres pojęciowy terminów AI, ML, DL oraz DM	173
<b>Rysunek 37.</b> Propozycja struktury inteligentnego systemu wsparcia projektantów	176
<b>Rysunek 38.</b> Wykorzystanie inteligentnego systemu wsparcia w procesach projektowych	177
<b>Rysunek 39.</b> Etapy uczenia maszynowego	180
<b>Rysunek 40.</b> Schemat funkcjonowania modelu MONOZUKURI AI w konfiguracji FTCP 3.0	181
<b>Rysunek 41.</b> Czynniki wpływające na projektowanie produktu	182
<b>Rysunek 42.</b> Przegląd rozwiązań SH	186
<b>Rysunek 43.</b> Chmura słów aktualnie dostępnych modeli biznesowych	204
<b>Rysunek 44.</b> Koncepcja DfX 4.0 – fazy cyklu życia produktu, przepływy dóbr i informacji, zadania gospodarki cyrkularnej oraz wykorzystywane technologie I 4.0	207
<b>Rysunek 45.</b> Chmura słów najczęściej pojawiających się w opisywanej literaturze	222



# Spis tabel

<b>Tabela 1.</b>	Trzy poziomy świadomości środowiskowej w organizacji	57
<b>Tabela 2.</b>	Procentowy rozkład publikacji dotyczących tematyki „środowiskowej” i „technologicznej” w aspekcie PD w latach 2016–2023	75
<b>Tabela 3.</b>	Procentowy rozkład krajów pochodzenia autorów publikacji oraz źródeł publikacji	76
<b>Tabela 4.</b>	Kategorie naukowe aspektów środowiskowych PD publikacji	79
<b>Tabela 5.</b>	Kategorie naukowe aspektów technologicznych PD publikacji	81
<b>Tabela 6.</b>	Zestawienie liczby zidentyfikowanych pozycji według zapytań w bazach Scopus i WOS	83
<b>Tabela 7.</b>	Interesariusze i zjednoczone cele zrównoważonego rozwoju w fazach cyklu życia produktu	108
<b>Tabela 8.</b>	Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne – od idei do dystrybucji	116
<b>Tabela 9.</b>	Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne w trakcie użytkowania	118
<b>Tabela 10.</b>	Strategie projektowania cyklu życia produktu uwzględniające cykle techniczne i biologiczne – zakończenie cyklu życia i ponowne projektowanie	119
<b>Tabela 11.</b>	Środowiskowe wymagania klientów oraz środowiskowe wskaźniki projektantów	126
<b>Tabela 12.</b>	Zielone strategie przedsiębiorstw	127
<b>Tabela 13.</b>	Przykłady terminologii i definicji GPD	134
<b>Tabela 14.</b>	Charakterystyka wymagań SMS w różnych kontekstach	142
<b>Tabela 15.</b>	Kompetencje I 4.0 wynikające z platformy testowej	146
<b>Tabela 16.</b>	Wybrane kategorie projektowe wspierane przez VR	154
<b>Tabela 17.</b>	Wybrane kanały komunikacji w aspekcie środowiska komunikacji	157
<b>Tabela 18.</b>	Cykl odczuj–analizuj–działaj z perspektywy człowieka i IoT	167
<b>Tabela 19.</b>	Jakościowe atrybuty przemysłowego Internetu Rzeczy	169
<b>Tabela 20.</b>	Wpływ wdrożenia AI w PD dla SM	183
<b>Tabela 21.</b>	Ewolucja procesu VPD w kierunku cyfrowej inżynierii	188



Monografia *Design for eXcellence 4.0. Projektowanie wspomagające doskonałość* zawiera kompleksowy i systematyczny przegląd literatury dotyczący koncepcji Design for eXcellence (DfX), wykorzystywanych w niej metod i technik oraz współczesnych trendów jej rozwoju.

W pierwszej części publikacji zaprezentowane są ogólne zagadnienia związane z projektowaniem wyrobów oraz koncepcją DfX. W części drugiej przedstawiono wyniki badań ilościowych i jakościowych odnoszące się do dwóch obecnie najważniejszych kontekstów wpływających na procesy projektowania i rozwoju produktów. Pierwszy odnosi się do kwestii środowiskowych, zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Drugi dotyczy zagadnień technologicznych, opierających się na założeniach, zasadach i technikach czwartej rewolucji przemysłowej. W trzeciej części opracowania ukazana jest autorska koncepcja DfX 4.0 uwzględniająca problematykę z zakresu cyrkularności produktów, logistyki odwrotnej, łańcuchów dostaw o obiegu zamkniętym oraz wykorzystania technologii przemysłu 4.0 w procesie projektowania i rozwoju produktów.

Książka jest dobrym punktem wyjścia do dyskusji o tym, jak powinno wyglądać projektowanie i rozwój produktów w najbliższej przyszłości.

**WYDAWNICTWO**  
UNIwersYTETU  
ŁÓDZKIEGO

wydawnictwo.uni.lodz.pl  
ksiegarnia@uni.lodz.pl  
(42) 665 58 63

Książka dostępna również  
jako e-book

ISBN 978-83-8331-551-5



9 788383 315515